



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS**

**CALIBRACIÓN DEL MODELO INTEGRADO
DE BASE FÍSICA KINEROS EN UNA
CUENCA SEMI-INSTRUMENTADA DEL
TRÓPICO HÚMEDO MEXICANO**

MARÍA TERESA VÁZQUEZ CONDE

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2012

La presente tesis titulada: **Calibración del modelo integrado de base física KINEROS en una cuenca semi-instrumentada del trópico húmedo mexicano**, realizada por la alumna: **María Teresa Vázquez Conde**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

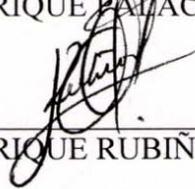
CONSEJERO


DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA

ASESOR


DR. ENRIQUE PALACIOS VÉLEZ

ASESOR


DR. ENRIQUE RUBIÑOS PANTA

ASESOR


DR. FERNANDO PAZ PELLAT

ASESOR


DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO

ASESOR


DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

CALIBRACIÓN DEL MODELO INTEGRADO DE BASE FÍSICA KINEROS EN UNA CUENCA SEMI-INSTRUMENTADA DEL TRÓPICO HÚMEDO MEXICANO

María Teresa Vázquez Conde, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2012

Se presenta la aplicación del modelo hidrológico *Kinematic Runoff and Erosion Model (KINEROS)* dentro de la plataforma GIS de modelado hidrológico denominada *Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA)*, en una cuenca semi-instrumentada de 352 km², con registros de lluvia y escurrimiento cada 24 horas. El modelo KINEROS permite analizar el comportamiento hidrológico de cuencas pequeñas (hasta 100 km²) sujetas a cambios de uso de suelo y cobertura vegetal. Una de las características principales del modelo es que realiza dicho análisis bajo la ocurrencia de eventos específicos de lluvia que pueden ser representados por intensidades, lluvia acumulada o por tormentas de diseño. KINEROS principalmente ha sido calibrado en cuencas de clima árido o semiárido en Estados Unidos. El interés de utilizar KINEROS radicó en analizar sus posibilidades para modelar hidrológicamente cuencas semi-instrumentadas en zonas de clima tropical húmedo y superficies superiores a 100 km². Para este propósito, se eligió como caso de estudio a la cuenca del río Huixtla, ubicada en la zona costera del estado de Chiapas, conocida por su problemática de inundaciones en México. La falta de hietogramas e hidrogramas, una característica común en las cuencas del país, condujo a la propuesta de una metodología para inferir los datos de lluvia necesarios para calibrar el modelo AGWA-KINEROS, por medio de la generación de hietogramas horarios para eventos de tormenta a partir de la lluvia registrada en 24 horas. Finalmente, después de realizar la calibración del modelo, se corroboró que el índice de saturación es el parámetro más sensible en el ajuste del gasto pico de salida, y se encontró que la duración y forma del hietograma de entrada es primordial para una adecuada calibración.

Palabras clave: KINEROS, índice de saturación, hietogramas sintéticos, curva masa, Río Huixtla.

**CALIBRATION OF THE PHYSICAL BASE INTEGRATED MODEL KINEROS IN A
SEMI-INSTRUMENTED BASIN OF THE MEXICAN TROPICAL WET CLIMATE**

María Teresa Vázquez Conde, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2012

SUMMARY

The model KINEROS (*Kinematic Runoff and Erosion Mode*), in GIS platform, included in hydrological simulator AGWA (*Automated Geospatial Watershed Assessment*), was run in a 352 km² watershed by using 24 hours rainfall and runoff records. KINEROS has been recommended to analyze the hydrological response of small basins (below 100 km²) and for specific rainfall events, that may be represented by rainfall intensity, accumulation depth rainfall or by design storms. This model has been mostly calibrated in semi-arid and arid regions of USA, however this work analyzes KINEROS's runoff responses for a watershed in a wet-tropical climate of Mexico. For this purpose, the Huixtla river basin, located in the costal State of Chiapas and well known area in Mexico for its major flood disasters, was used as a case study. The lack of hyetographs and hydrographs, a common feature between the country's watersheds, led to a methodology proposal, in order to infer the input rainfall data needed to feed KINEROS, through the generation of hourly hyetographs from daily records of rainfall. Finally, after performing the model calibration, it was corroborated that the saturation index is the most sensitive parameter in adjusting the peak flow output. In addition, it was found that the hydrograph duration and shape are essential for an appropriated calibration.

Key words: KINEROS, saturation index, synthetic hyetographs, mass curve, Río Huixtla

-No estudio por saber más, sino por ignorar menos-

Sor Juana Inés de la Cruz

-No hay que confundir nunca el conocimiento
con la sabiduría. El primero nos sirve para
ganarnos la vida; la sabiduría nos ayuda a vivir-

Sorcha Carey

DEDICATORIA

A mi amado Beto, de quien he aprendido el significado del amor y entrega en pareja. Gracias infinitas por tu apoyo durante estos años y siempre. Por tu presencia, tu paciencia, tu cariño, tu comprensión, por hacerme reír y darme palabras de ánimo, por estar conmigo en los momentos difíciles y horas de desvelo. Mi agradecimiento es tan grande que no tengo las suficientes palabras para expresarlo.

A mis amados padres Daniel y Malú Esther, con profundo amor y respeto. Gracias por darme la vida y por infundir en todos nosotros, sus hijos, valores de nobleza, amor, lucha, perseverancia, esperanza, fe, compasión, perdón, fortaleza y alegría. Gracias por todo su apoyo y comprensión durante esta etapa de mi vida, y por su entrega de siempre.

A mis amados hermanos Daniel, Belem, Leonardo y Esther. Gracias por su apoyo Daniel y Belem.

A Oscar, mi sobrino único, porque su existencia es una alegría en mi vida.

A aquellas personas que son importantes en mi vida por el privilegio de tener su sincera amistad y cariño.

A todos los que me apoyaron durante esta etapa de mi vida de una u otra manera.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Energía Eterna Divina, la AIN SOPH OR, creadora de todo lo finito e infinito, y a la Vida, por todas las bendiciones que he tenido en mi vida. Entre ellas concluir con esta etapa de mi vida, rodeada de mis seres queridos y porque durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados (COLPOS) conocí a gente que fue muy importante para la conclusión de mis estudios, personas valiosas no sólo en el ámbito del conocimiento sino también y más importante, como seres humanos. Ellas permitieron que mi estancia en COLPOS fuera fructífera y agradable. Me llevo un gran recuerdo, agradecimiento, estimación, respeto y admiración para todos ellos.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento económico que me dio la oportunidad de realizar y concluir mis estudios de Doctorado en el Colegio de Postgraduados.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), mi *Alma Mater*, por inspirarme académicamente para continuar en el camino del aprendizaje y superación, porque me dio bases sólidas para llegar a este objetivo de mi vida.

Agradezco al Dr. José Luis Oropeza Mota por abrirme desinteresadamente las puertas para iniciar mis estudios de Doctorado en COLPOS, y por haberme transmitido sus profundos conocimientos y experiencias que formaron parte de mi madurez en el aprendizaje adquirido.

Agradezco a cada uno de mis Asesores: Dr. Enrique Palacios Vélez, Dr. Enrique Rubiños Panta, Dr. Fernando Paz Pellat, Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso y Dr. Ramón Domínguez Mora, quienes fungieron como parte de mi Jurado; porque gracias a su gran experiencia y amplio aporte académico, dieron riqueza al contenido de mi trabajo.

Agradezco a mi Sinodal Doctor Mario Martínez Menes, por sus atinados comentarios y sugerencias al trabajo realizado y por su enseñanza en las aulas.

Agradezco al Dr. Ramón Domínguez Mora quien a lo largo de mi vida profesional ha sido un ejemplo a seguir, por la abierta disponibilidad a compartir sus vastos conocimientos, por su sencillez y calidad humana; además de ser un verdadero privilegio conocerlo, y considerarlo no solamente un maestro sino un amigo.

Quiero dar un especial y profundo agradecimiento al Dr. Demetrio Fernández Reynoso no solamente por su invaluable aporte y conocimiento académico sino por su apoyo moral, sus palabras de aliento y por haberme extendido una mano amiga en momentos difíciles durante el desarrollo de mi trabajo.

Agradezco a todas las personas que de una u otra manera hicieron posible la conclusión de mi trabajo, por el profesionalismo con el que desempeñan sus actividades diarias: el personal de la Biblioteca, las secretarias Salus, Mari, Diana, María Elena, Paty y María Esther. Un reconocimiento especial a la Licenciada María del Carmen Padilla Pastrana, Encargada del Área de Servicios Académicos, por ser un verdadero apoyo y guía en el desarrollo de los trámites administrativos, y de igual manera al personal a su digno cargo. Gracias también al personal de apoyo de la Subdirección de Educación.

Agradezco al Dr. Fermín Pascual y al M. en C. Carlos Palacios por su experiencia e invaluable asesoría en el manejo de los Sistemas de Información Geográfica; gracias a la M. C. Isabel Marín por su asesoría para correr adecuadamente el Clasificador Genérico y en otros temas importantes.

Agradezco a la M. en I. Guadalupe Fuentes Mariles, al Dr. Moisés Berezowsky Verduzco y al Dr. Jesús Gracia Sánchez, del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por brindarme información y por sus valiosas ideas, sugerencias y comentarios para la realización del proyecto.

Agradezco a todas las personas que tuvieron a bien facilitarme información y apoyarme durante la visita realizada a la ciudad de Huixtla y Tuxtla Gutierrez, Chiapas, para recabar información sobre la cuenca del Rio Huixtla: al Prof. Luis Torres Cedillo e Ing. Luis Torres Benitez de la empresa Manejo Integral de Cuencas, S.A. de C.V. (MICAS); Ing. Romeo de Jesús Rodríguez e Ing. López quienes me apoyaron en la visita técnica a lo largo de diversos puntos en la cuenca; M. en I. Horacio Rubio Gutiérrez y M. en I. Gabriel López Espinosa de la Cuenca Frontera Sur de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y Dra. Delva Guichard Romero de la Universidad Nacional Autónoma de Chiapas (UNACH-Facultad de Ingeniería).

Agradezco a los Ingenieros Othón Cervantes Sánchez, Jesús Landeros, Alejandro González Serratos y Adolfo Carrero, por su amable y valiosa ayuda en la obtención de datos climatológicos en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	5
3. HIPÓTESIS.....	5
4. SUPUESTOS.....	5
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
5.1 Descripción del área de estudio	6
5.2 Marco teórico.....	14
5.2.1 Plataforma GIS de modelado hidrológico AGWA	14
5.2.1.1 Parámetros de entrada y tareas que ejecuta AGWA- KINEROS	17
5.2.2 Modelo hidrológico KINEROS2.....	27
5.2.2.1 Descripción del modelo	27
5.2.2.2 Componentes de KINEROS	30
5.2.2.3 Procesos simulados por KINEROS	30
5.3 Revisión bibliográfica.....	35
5.4 Materiales utilizados.....	43
5.5 Métodos	45
5.5.1 Procesamiento del modelo digital de elevación	45
5.5.2 Procesamiento de la capa de vegetación y modificación a la tabla de consulta <i>nalc_lut</i>	45
5.5.3 Procesamiento de la capa de suelos.....	49
5.5.4 Procesamiento del gasto base.....	49
5.5.5 Procesamiento de los valores iniciales del índice de saturación, S_i	50
5.5.6 Procesamiento de los datos de precipitación.....	50

5.5.6.1 Selección de tormentas a calibrar	50
5.5.6.2 Métodos para construir hietogramas horarios y su respectiva curva masa, a partir de lluvia registrada en 24 hr	69
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	88
6.1 Corridas de selección del mejor método para la construcción de hietogramas	88
6.2 Calibración de AGWA-KINEROS	91
6.3 Sensibilidad de los parámetros de entrada	94
6.4 Análisis de frecuencias de la lluvia horaria (en forma de lluvia acumulada), registrada en el Observatorio Meteorológico de Tapachula	97
7. CONCLUSIONES	99
8. BIBLIOGRAFÍA	106
ANEXO A. TORMENTAS PRELIMINARES	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1 Ubicación de la cuenca del río Huixtla.....	7
Figura 5.2 Topografía y red de drenaje de la cuenca del río Huixtla hasta la población de Huixtla	8
Figura 5.3 Porcentaje de tramos de río correspondientes a diferentes rangos de pendiente.....	9
Figura 5.4 Ensanchamiento del cauce del Río Coatán (Mundo, 2007) y del Río Huixtla, antes y después de octubre de 2005.....	10
Figura 5.5 Mapa de víctimas por las lluvias en Chiapas (Periódico El Universal 17/09/99) ..	13
Figura 5.6 Trayectoria del huracán “Stan” del océano Atlántico (1-5 octubre, 2005)	14
Figura 5.7 Tareas que realiza AGWA en el menú AGWA Tools en Arc View 3.2	19
Figura 5.8 Datos de entrada y tareas que ejecuta AGWA-KINEROS.....	20
Figura 5.9 Vista del menú para generar el archivo de parámetros con la opción de aplicar los multiplicadores	26
Figura 5.10 Ilustración esquemática de la abstracción realizada por KINEROS a una cuenca, a través de una red de planos y canales que representan la trayectorias de flujo dentro de la cuenca (Arbuet, 2009).....	29
Figura 5.11 Suelos FAO que intersectan a la cuenca del Río Huixtla.....	49
Figura 5.12 Proceso para elegir las posibles tormentas junto como su duración	53
Figura 5.13 Ejemplo de tormentas a las que se aplicó el criterio de la lluvia acumulada de dos días consecutivos	54
Figura 5.14 Correlación entre los gastos medios diarios de la estación Huixtla y los correspondientes a las cuencas vecinas	56
Figura 5.15 Ejemplo de comparación de gastos entre Huixtla y Despoblado	58
Figura 5.16 Correlación entre la lluvia media diaria de 1 día y el gasto medio diario del mismo día	63
Figura 5.17 Correlación entre la lluvia acumulada de 2 días y el gasto medio diario del segundo día.....	63

Figura 5.18 Relación entre los parámetros (a, b, c) de una tormenta estándar y la razón de la lluvia de 1 hora con la de 24 horas (Chen, 1969. Pereyra_Díaz et al, 2005).	73
Figura 5.19 Distribución del factor K para la República Mexicana (Baeza, 2007).....	75
Figura 5.20 Hietograma y curva masa para la lluvia del 14 de septiembre de 1981 obtenidos con el método de Chen-Domínguez.....	78
Figura 5.21 Tipos de distribución para lluvias en 24 horas (SCS) (USDA, 1986).....	80
Figura 5.22 Hietograma y curva masa para la lluvia del 14 de septiembre de 1981 obtenidos con el método del SCS Tipo II.....	80
Figura 5.23 Hietograma y curva masa para la lluvia del 14 de septiembre de 1981 obtenidos con el método de la Curva Masa.....	85
Figura 5.24 Curva masa para la lluvia del 14 de septiembre de 1981 obtenida con el método de la tormenta paralela	87
Figura 6.1 Comparación entre los valores de gasto pico medido y estimado con respecto a la lluvia simulada para cada tormenta analizada.....	94
Figura 6.2 Frecuencia de duración por rango de lluvia acumulada entre 60.1 mm y 70 mm	98
Figura A.1 Representación de la lluvia y escurrimiento entre mayo y octubre de cada año registrado en la estación climatológica e hidrométrica de Huixtla.....	118
Figura A.2 Primer criterio de selección. Tormentas con el gasto máximo medio diario por año (17 en total).....	121
Figura A.3 Segundo criterio de selección. Tormentas que generaron gastos máximos cercanos al máximo por año.....	124
Figura A.4 Tercer criterio de selección. Tormentas que presentaron lluvias mayores a 100 mm.....	126
Figura A.5 Hietogramas e hidrogramas anuales de las tormentas preliminares de la década de los ochenta y noventa.....	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1 Resumen de daños	15
Tabla 5.2 Tipo de información necesaria para correr el modelo AGWA-KINEROS	18
Tabla 5.3 Valores asignados por default a ciertos parámetros obtenidos al discretizar la cuenca en elementos-canal	21
Tabla 5.4 Parámetros obtenidos para cada elemento-plano de la cuenca durante la parametrización del grid de uso/coertura del suelo y el shape de suelos	22
Tabla 5.5 Variables de salida que ofrece KINEROS	27
Tabla 5.6 Sensibilidad de los parámetros de entrada de KINEROS2*	41
Tabla 5.7 Información general de las estaciones hidrométricas con que se trabajó en la región de la Cuenca del río Huixtla.....	44
Tabla 5.8 Características generales de las estaciones climatológicas de la región de la cuenca de Huixtla	45
Tabla 5.9. Clases temáticas utilizadas y coberturas asociadas.....	47
Tabla 5.10 Extensión que ocupa cada clase de cobertura vegetal	48
Tabla 5.11 Tabla de consulta <i>nalc_lut</i> con las clases temáticas del clasificador genérico	48
Tabla 5.12 Equivalencia entre las clases del Clasificador Genérico y usos de suelo	48
Tabla 5.13 Imágenes de satélite que fueron utilizadas en la calibración, previa aplicación del clasificador genérico	49
Tabla 5. 14. Funciones de correlación entre Huixtla y cuencas vecinas.....	57
Tabla 5.15 Primera selección de tormentas y reducción de éstas en dos procesos de revisión	59
Tabla 5.16 Tormentas de 1 día de duración para la década de los ochenta, a partir de tormentas de 14 días	61
Tabla 5.17 Tormentas de 1 día de duración para la década de los noventa, a partir de tormentas de 14 días	62
Tabla 5.18 Características principales de las correlaciones que mejor se ajustaron a los datos de lluvia-gasto.....	64
Tabla 5.19 Tormentas con el criterio $hp_{1\text{día}} > 40 \text{ mm}$ y $0.7 < \text{Coeficiente} < 1.3$	64
Tabla 5.20 Tormentas con el criterio $hp_{2\text{días}} > 40 \text{ mm}$ y $0.7 < \text{Coeficiente} < 1.3$	65

Tabla 5.21. Tabla comparativa entre tormentas de 1 día y 2 días con coeficiente mayor a 0.7 y menor a 1.3.....	67
Tabla 5.22. Tormentas probables de 1 día para calibrar el modelo KINEROS en la cuenca de Huixtla.....	68
Tabla 5.23 Tormentas definitivas para calibrar el modelo KINEROS en la cuenca de Huixtla	68
Tabla 5.24 Relación P_T^d/P_T^1 para $K = 0.35$	76
Tabla 5.25 Ejemplo de construcción de hietogramas y su respectiva curva masa a partir del método Chen-Domínguez	77
Tabla 5.26 Acumulación de lluvia en 24 horas (USDA, 1973).....	79
Tabla 5.27 Eventos de lluvia paralela en Tapachula correspondientes a cada lluvia en Huixtla	86
Tabla 6.1 Resultados de las corridas de AGWA-KINEROS utilizando los métodos propuestos para construir hietogramas. Tormentas de la década de los años ochenta.....	89
Tabla 6.2 Resultados de las corridas de AGWA-KINEROS para calibrar el índice de saturación, S_i para cada tormenta seleccionada para dicho fin.....	93
Tabla 6.3 Ajuste de duración y forma de la tormenta del 24 de septiembre de 1982.....	96
Tabla 7.1 Comparación entre valores de gasto pico de salida obtenidos con el índice de saturación inicial y el calibrado.....	101

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la hidrología del Manejo de Cuencas, conocer el balance hídrico de la cuenca en estudio es primordial para entender su funcionamiento, y así analizar y resolver problemas de diferentes ámbitos como inundaciones, erosión, sedimentación, contaminación ambiental en agua y suelo, degradación del régimen hidrológico, deslizamientos, escasez de agua, etc., con el propósito de recuperar, proteger y en general, conservar los recursos naturales de la cuenca¹. La importancia de usar modelos hidrológicos que ayuden a alcanzar este fin es incuestionable, sobre todo los que se apoyan en los sistemas de información geográfica, ya que permiten una perspectiva espacial del manejo de los datos y un análisis más detallado de los parámetros involucrados en el estudio de la cuenca.

El trabajo desarrollado en la presente tesis surgió del interés de analizar cuencas en México donde las inundaciones representan un grave problema por los daños provocados en la población, infraestructura, economía y medio ambiente, entre otras cosas. En este caso, la modelación espacial de la cuenca es fundamental para estudiar su respuesta hidrológica ante determinadas características de uso de suelo y vegetación.

Dado que el fenómeno detonador de una inundación es generalmente la lluvia, se requiere de un modelo hidrológico que considere eventos de lluvia menores a 24 horas. Esta es la razón por la cual se eligió el modelo distribuido de base física *Kinematic Runoff and Erosion Model* (KINEROS) dentro de la plataforma GIS de modelado hidrológico denominada *Automated Geospatial Watershed Assessment* (AGWA), pues trabaja con base en eventos de tormenta, representada en intensidades, lluvia acumulada, o en tormentas de diseño.

Por otro lado, es bien sabido que la región sur del país presenta frecuentemente problemas de inundación, como son las cuencas de la costa de Chiapas, que fueron impactadas negativamente por eventos hidrometeorológicos extremos en 1998 y 2005, con la lamentable pérdida de vidas humanas, el consecuente deterioro de los recursos naturales asociados a sistemas de producción

¹ Dourojeanni, 1994 señala que manejar una cuenca significa actuar en forma coordinada sobre los recursos naturales de la misma con el fin de recuperarlos, protegerlos y en general conservarlos.

agrícolas y pecuarios, y dañando la infraestructura de desarrollo social y productiva. Este fue el caso de la cuenca semi-instrumentada² del Río Huixtla en la Costa de Chiapas, de clima trópico húmedo, donde se decidió calibrar el modelo hidrológico KINEROS. La cuenca del Río Huixtla, con un área de 377 km² hasta la estación climatológica de Huixtla, tiene la característica de ser una cuenca torrencial, lo que significa que su respuesta hidrológica es rápida con un tiempo de concentración de 4.35 horas; representando el tiempo que tarda en recorrer el agua desde su precipitación en la parte más alta de la cuenca hasta la desembocadura en el cauce principal con una longitud de 51 kilómetros.

La calibración del modelo hidrológico AGWA-KINEROS, permite tener la certeza de que los resultados que se obtengan en cualquier estudio hidrológico de la cuenca serán lo más representativos al comportamiento real de ésta. Dicha calibración también permitirá analizar, en este caso, el grado de confiabilidad del modelo en cuencas del trópico húmedo. El modelo ha sido aplicado en algunas cuencas de clima tropical húmedo del país, sin haber realizado su respectiva calibración dando por asentado que el modelo funciona correctamente para este tipo de climas, cuando es importante considerar que KINEROS originalmente fue concebido en Estados Unidos para cuencas semiáridas o áridas.

La demanda de datos de entrada en programas como KINEROS, SWAT o WEPP, por mencionar sólo algunos, requieren de información topográfica, de uso de suelo, edafológica, climatológica e hidrométrica de la cuenca en estudio; sin embargo, la disponibilidad de datos del tipo hidrológico, meteorológico y biofísico que se adapten al modelo, no siempre es posible conseguirlos en los sitios de interés (Brooks et al, 2003). Al respecto, México tiene un serio déficit de estaciones climatológicas e hidrométricas con registros diarios, y de pluviógrafos, que comenzó en la década de los años ochenta cuando se decidió recortar a la mitad el número de estaciones que existían en esa época, por falta de presupuesto (en el año de 1970 se tenían 2688 pluviómetros, 345 pluviógrafos, 907 estaciones con escala y 432 estaciones con limnógrafo, SRH, 1976). Esta situación ha empeorado, debido a que a lo largo del tiempo han dejado de funcionar otras estaciones, en algunas ocasiones por el embate de los ciclones tropicales o lluvias

² Se define como cuenca semi-instrumentada aquella que cuenta con información climatológica e hidrométrica diaria, es decir, no registra intervalos de tiempo menor a 24 horas.

intensas, que han dejado inservibles o han arrastrado aparatos de medición ubicados a la orilla de los ríos. Lamentablemente los organismos gubernamentales encargados de realizar la instrumentación en las cuencas del país, dejaron perder información climatológica valiosa que se venía registrando aproximadamente desde los años cuarenta o cincuenta en las estaciones que se decidieron cancelar, además que tampoco existe un mantenimiento adecuado en las estaciones existentes. Sin embargo, hay que dar crédito a la instalación de estaciones automáticas pluviométricas que se dio a finales del siglo pasado, con el único inconveniente de que el registro de años disponible aun es muy corto, comparado con las estaciones que se tenían anteriormente instaladas.

Así pues, en la mayoría de los casos de estudio de cuencas en México, sobre todo en cuencas de tamaño intermedio-pequeño (entre 250 a 500 km²) a muy pequeño (menor a 25 km²), según la clasificación propuesta por Campos (1998), existe la gran limitante de contar con información escasa o nula de lluvias y escurrimientos. La cuenca del Río Huixtla, no es la excepción ya que cuenta con una estación de registros de lluvia diaria y otra de escurrimiento diario cuyo último año de registro efectivo fue en 1996.

Aun cuando el modelo KINEROS tiene la ventaja de que cuenta con un número sustancialmente menor de parámetros de entrada, comparado con el modelo hidrológico SWAT (éste último utiliza no menos de 20 parámetros por subcuenca con incidencia representativa tan sólo en el módulo hidrológico, Herrero, 2004), su calibración se dificulta debido a la información hidrológica diaria con que cuenta la cuenca del Río Huixtla, ya que se requiere de información de tormentas específicas con duración menor a 24 horas, además de que la calibración del escurrimiento estimado por el modelo se debe realizar en el entendido de que únicamente se cuenta con el registro de los gastos medios diarios y de los gastos máximos mensuales.

Con estas limitantes en los datos de entrada del modelo KINEROS, calibrar el modelo representa un desafío que vale la pena realizar para revisar la conveniencia y grado de dificultad de utilizarlo en cuencas semi-instrumentadas de clima tropical-húmedo, donde la cuenca del Río Huixtla representa uno de los múltiples casos de falta de datos en las cuencas hidrográficas de México.

En el presente trabajo se propone una metodología para la parte concerniente a la variable de entrada de lluvia al programa, la cual debe ser insertada como hietograma ya sea en pares de lluvia acumulada-tiempo o intensidad-tiempo. El reto consistió en construir hietogramas para cada uno de los 6 eventos de tormenta elegidos para la calibración de KINEROS-AGWA, partiendo de datos de lluvia registrados cada 24 horas, teniendo como apoyo la lluvia horaria del Observatorio Meteorológico de Tapachula, estación cercana a Huixtla. Cabe aclarar que en este caso no se está hablando de tormentas de diseño para lo cual existen métodos para su obtención, sino de la construcción de hietogramas horarios para eventos específicos de lluvia. Se presenta además, el manejo de las tablas de consulta que requiere KINEROS, principalmente la tabla *nalc_lut* que se refiere a los datos de uso de suelo y vegetación.

Posteriormente, se presenta la calibración del modelo junto con los resultados obtenidos, la sensibilidad de índice de saturación, como parámetro importante de calibración del modelo, así como un análisis de frecuencias que se realizó a los datos horarios de las tormentas del Observatorio Meteorológico de Tapachula. Finalmente se presentan conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado.

2. OBJETIVOS

- i. Mostrar las posibilidades de simulación hidrológica del modelo KINEROS en una cuenca semi-instrumentada de clima tropical-húmedo.
- ii. Mostrar las posibilidades de simulación hidrológica del modelo AGWA-interfase KINEROS- para utilizarse en cuencas relativamente mayores a 100 km².
- iii. Ensayar diferentes metodologías para generar hietogramas a partir de registros de lluvia en 24 horas.

3. HIPÓTESIS

- i. Es posible calibrar el modelo KINEROS con la información meteorológica e hidrométrica a nivel diario disponible en México.
- ii. Es posible estimar la duración y forma del hietograma de una lluvia con registro de 24 horas, necesario para la calibración del modelo, a partir de la lluvia horaria registrada en una estación cercana.

4. SUPUESTOS

- i. Los eventos de tormenta que caen dentro de un rango del 30 % de la línea de ajuste de correlación entre la precipitación y el gasto de 24 horas, corresponden a eventos máximos de tormenta.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Descripción del área de estudio

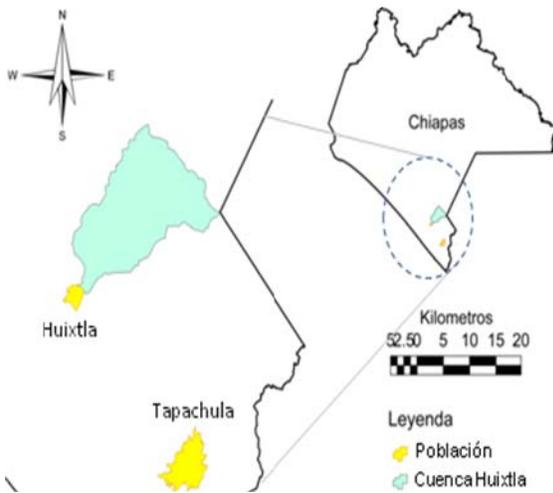
La cuenca del río Huixtla se encuentra en la Costa de Chiapas al sur del estado de Chiapas, relativamente próxima a la frontera con Guatemala. Abarca un área de 603 km² hasta su desembocadura en los pantanos cerca del mar y de 377 km² hasta la estación hidrométrica Huixtla (Figura 5.1a), tiene un escurrimiento medio anual superficial de 517.96 hm³/año, un escurrimiento máximo anual de 702 m³/s registrado en 1963 (SARH, 1973), y una lámina de escurrimiento de 727.85 mm.

Desde el punto de vista hidrológico, la Comisión Nacional del Agua ubica a la cuenca del Río Huixtla en la Región Hidrológica No. 23, conocida como Costa de Chiapas, donde también se ubican los ríos Suchiate, Coatán, Cahuacán, Huehuetán, Despoblado, Novillero y Pijjiapan, entre otros, y es la que queda más al sur del país, sobre la vertiente del Pacífico.

Fisiografía. La estructura general de esta región queda completamente definida por la existencia de la Sierra Madre de Chiapas o Macizo Granítico de Chiapas, ubicada en la Provincia Fisiográfica de la Sierra de Chiapas, subprovincia Sierra Cristalina, que origina un parteaguas paralelo a la costa, en el cual se tienen altitudes máximas hasta de 2900 msnm en la Sierra de Soconusco, donde se ubica la cuenca de Huixtla (Figura 5.1b), y de 2500 msnm en el Cerro de Tres Picos, al noreste de Tonalá, Chis. (SARH, 1970). La Sierra Madre de Chiapas es una cadena montañosa formada principalmente por rocas graníticas o cristalinas, que son la continuación del macizo montañoso de América Central y que constituyen un extenso batolito del Paleozoico Tardío. El flanco suroeste es de laderas muy abruptas sobre las que drenan las corrientes que descienden hacia la planicie costera del Pacífico (CONAGUA, 2002).

Por otro lado, la planicie costera ha sido formada por una acumulación de sedimentos que bajan de la sierra en ambientes fluviales, así como por los procesos de tipo marino costero. El primer proceso citado ha formado depósitos aluviales, sedimentos fluviales y depósitos de meandros; mientras que los procesos marinos costeros han originado la presencia de arenas

de playa, antiguas líneas de costa, zonas de manglar y llanuras de inundación (CONAGUA, 2002).



a. Ubicación de la cuenca a nivel estatal (hasta la estación hidrométrica Huixtla en la población del mismo nombre)



b. Ubicación de la cuenca en la Sierra Soconusco, Chiapas. Fuente: Google Earth (imagen nov. 2005)

Figura 5.1 Ubicación de la cuenca del río Huixtla

Debido a la estructura particular de la Sierra Madre de Chiapas, los ríos que se originan en la vertiente del Pacífico bajan por una pendiente muy fuerte en la fase inicial de su recorrido (mayores de 30°), formando en su trayecto rápidos y pequeñas caídas de agua y algunas cascadas, luego la pendiente se vuelve muy suave en el tramo final (menores de 7°). Esto da lugar a que en las desembocaduras de los ríos se presenten desbordamientos frecuentes y a la formación de lagunas, encharcamientos, pantanos, etc. Los ríos provenientes de la Sierra Madre de Chiapas se caracterizan por tener un curso pequeño debido a la corta distancia entre el lugar de su nacimiento y su desembocadura (varían aproximadamente entre 44 km en el Río Pijijiapan y 75 km en el Río Huixtla como una de las longitudes máximas) (SARH, 1970, Espíritu, 2006).

Hidrología. La corriente principal en la cuenca es el río Huixtla, el cual desciende de la Sierra, desde los 2,780 msnm (Figura 5.2), y pasa por un costado de la ciudad de Huixtla a 33 km aproximadamente de la desembocadura de río al mar.

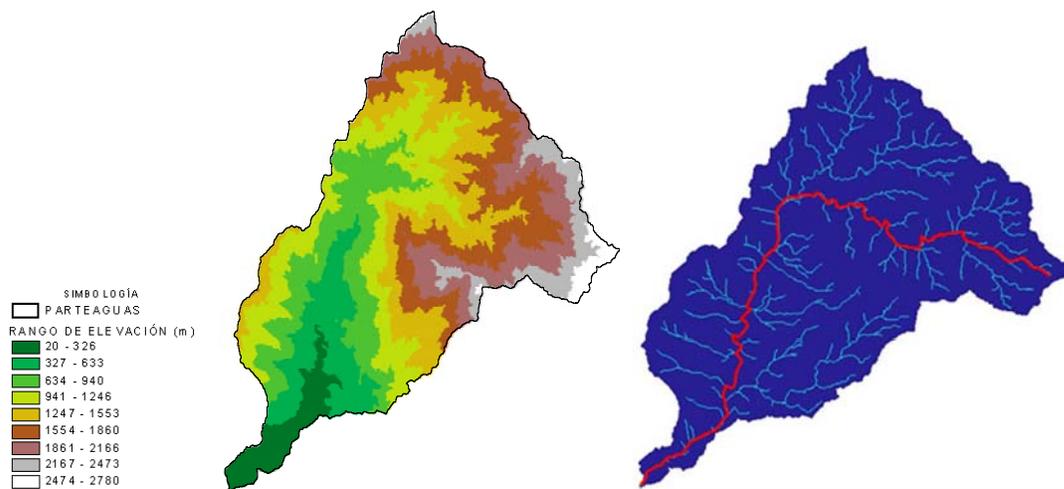


Figura 5.2 Topografía y red de drenaje de la cuenca del río Huixtla hasta la población de Huixtla

El Río Huixtla está bien definido desde su nacimiento, se constituye por tres afluentes principales de los cuales el más oriental tiene su origen en la república de Guatemala, por lo cual la cuenca del río se desarrolla en una fracción muy pequeña dentro de ese país y es el que está considerado como su formador. Sigue una trayectoria E-W de aproximadamente 25 km al cabo de los cuales confluyen por la derecha los otros dos arroyos mencionados anteriormente. A partir de la confluencia el río comienza a recibir el nombre de Huixtla y recorre unos 17 km en dirección general norte-sur para recibir por la izquierda otra aportación importante constituida por el Río Negro. En esta nueva confluencia se acusa un cambio de dirección hacia el sur-oeste hasta la ciudad de Huixtla situada 8 km aguas abajo. A partir de ahí recupera la dirección que tenía en el tramo precedente, recibe otro afluente llamado Río Temazapa y 30 km delante de Huixtla el recorrido se vuelve ya impreciso formando una amplia zona de marismas, en unión de las corrientes vecinas (SARH, 1970).

La longitud del cauce principal del Río Huixtla hasta su desembocadura al mar es de 75 km, hasta la estación hidrométrica de Huixtla es de 50.97 km, con un desnivel altitudinal de 2536 metros y una pendiente media del cauce de 4.98%. El cálculo del tiempo de concentración por medio de la fórmula de Kirpich, usando las características anteriores, arroja un valor de 4.35 hrs. Como es evidente, este tiempo es muy corto, lo que indica que la respuesta

hidrológica de la cuenca es muy rápida, principalmente para eventos de mayor duración, provocando inundaciones extensas en la parte de la llanura costera así como el arrastre de grandes volúmenes de sedimento depositados en los abanicos aluviales.

La propia morfología de la cuenca genera fuertes procesos de erosión con los consecuentes desprendimientos de material rocoso y sedimentos, así como movimientos en masa en las partes altas de la cuenca cuando se presentan condiciones meteorológicas extremas. Un 29% de los ríos de la cuenca tienen pendientes superiores al 30% (Figura 5.3), donde las laderas de dichos tramos de río presentan los procesos mencionados. Además, cuando ocurre una inundación, el cauce puede crecer cientos de metros a lo ancho, principalmente a la altura del abanico aluvial, como se observó durante el evento desastroso de 2005 en todos los ríos de la Costa de Chiapas (Figura 5.4).

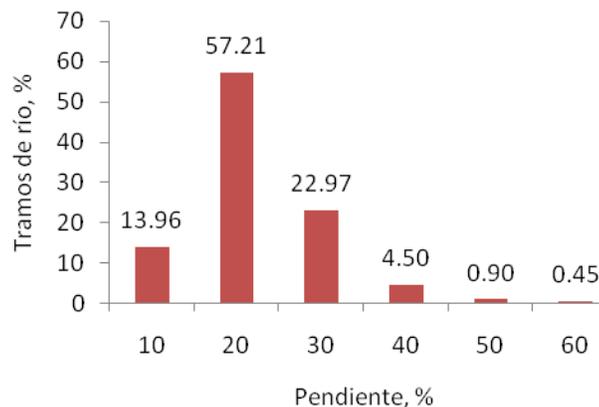


Figura 5.3 Porcentaje de tramos de río correspondientes a diferentes rangos de pendiente

La erosión es acelerada por la deforestación para dar paso a la agricultura, principalmente de maíz y algunas plantaciones de plátano y coco, mismas que posteriormente son abandonadas para privilegiar la ganadería, implantando pastos inducidos, lo que ha incrementado la susceptibilidad a la erosión en los municipios de Arriaga, Tonalá, Pijijiapan, Mapastepec, Acapetahua, Acacoyagua, Pueblo Nuevo Solistahuacán, Escuintla, Huixtla, Tuzantán, Tuxtla Chico y Huehuetán. Esta erosión también se exagera por factores como la presencia de rocas ígneas intrusivas muy alteradas y el drenaje natural caudaloso (Ecosur, 2008).



a. Tramo del Río Coatán antes de octubre de 2005



b. Tramo del Río Coatán después de octubre de 2005



c. Río Huixtla y población (foto aérea 1992)



d. Ensanchamiento del cauce del Río Huixtla (Google 2005)

Figura 5.4 Ensanchamiento del cauce del Río Coatán (Mundo, 2007) y del Río Huixtla, antes y después de octubre de 2005

Precipitación. La precipitación es abundante en toda la Costa de Tapachula, con una media anual de 2660 mm (González, 2005), sobresale el valor máximo registrado en la estación Chiripa, a 32 km al norte de Tapachula dentro de la cuenca del Río Cahucán, de 5,164 mm de lluvia anual máxima en el año de 1953 (Cruz, 2004). La precipitación media anual que se presenta en la cuenca del Río Huixtla es de 3,307 mm (Cordero, 2008). En general, la lluvia se concentra entre los meses de mayo y octubre en que llueve aproximadamente el 90% de la lámina anual total. En el resto de los meses hay lluvias menores que se presentan con regularidad.

Por su ubicación geográfica, la costa de Chiapas se encuentra expuesta a lluvias convectivas y orográficas, provocadas por la afluencia de humedad traída por las ondas del este, la

entrada de aire marítimo tropical, por el paso de ciclones tropicales, e incluso algunos llegar a aseverar que por el fenómeno del Niño (referido por Guichard, 2008 y Arellano, 2009). En cuanto al paso de ciclones tropicales en la zona, se han presentado en promedio cinco en un período de análisis de 52 años, ya sea como tormenta tropical o como huracán (Rosengaus et al, 2002), lo cual habla de una baja probabilidad de incidencia.

Temperatura y evaporación. Al estar la región situada más al sur del país, se registran temperaturas elevadas. En este aspecto sobresalen los 44.5 °C registrados en mayo de 1921 en Tonalá, Chis., y 45 °C en junio de 1966. La temperatura media mínima anual es de 21.38° C, registrándose durante los meses de diciembre y enero, mientras que la temperatura media máxima anual es de 31.5 °C, misma que se presenta durante los meses de mayo, junio y julio. La temperatura media anual en la cabecera municipal de Huixtla es de 27 °C (Suárez, 2006).

La lámina evaporada media anual es en promedio de 1,600 mm.

Clima. De acuerdo con la clasificación de Thornthwaite, son dos climas típicos dominantes dentro de la Región Hidrológica 23 (Costa de Chiapas). Hacia la zona del Suchiate, Tapachula, Huixtla y Escuintla, existe un núcleo bien definido de clima muy húmedo sin estación seca bien definida y cálido sin estación invernal bien definida. Rodeando a ese núcleo y en todo el resto de la región el clima es húmedo con invierno y primavera secos y cálido sin estación invernal bien definida (SARH, 1970).

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1988), la zona de Huixtla es de clima cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano.

Vegetación y uso de suelo. La cuenca del río Huixtla presenta vegetación de bosque de pino encino, selva caducifolia y subcaducifolia, pastizal inducido y cultivado, agricultura y manglar (Ecosur, 2008, Jiménez, 2007).

Suelos. Los ambientes erosivos del sistema montañoso de la Sierra Madre de Chiapas están ligados principalmente a suelos como: a) Regosoles, b) Litosoles, c) Cambisoles, d) Acrisoles, e) Feozem. Los dos primeros son suelos someros, no presentan capas distintas y se parecen bastante a la roca que los subyace; el tercero se caracteriza por ser un suelo joven y poco desarrollado con una pequeña formación de terrones con acumulación de arcillas, carbonato de calcio y fierro. El cuarto tiene acumulación de arcillas y son muy ácidos, por último el Feozem es un suelo que se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica. Todos estos suelos son susceptibles a la erosión (Ecosur, 2008).

Por lo que respecta a las montañas volcánicas de la región del Soconusco, se establece una relación entre un ambiente erosivo y suelos de tipo: a) Acrisol, b) Andosol, este último es un suelo de origen volcánico de textura esponjosa muy susceptible a la erosión. En contraste a los ambientes erosivos de la montaña, en la Planicie Costera del Pacífico se establecen ambientes de acumulación o pedogénesis, y los principales tipos de suelos que se ubican son: 1) Cambisol eútrico, 2) Regosol, 3) Feozem, 4) suelos salinos como el Solonchak, 5) de inundación como el Gleysol, 6) Fluvisol, este último corresponde a un suelo que se forma por la acumulación de materiales, los cuales son acarreados por un río (Ecosur, 2008).

Los suelos que predominan en la cuenca del río Huixtla tienen la clase textural de migajón-arenoso de origen granítico, originados por el arrastre y depósito de corrientes que bajan de la sierra, le siguen en segundo lugar los de arena migajonosa y por último los suelos francos (Jiménez, 2007). Existen además afloramientos de suelos ígneos extrusivos, mientras que las zonas más cercanas a la costa presentan suelos originados por el depósito de materiales aluviales y litorales (Galván-Fernández, 2006). De acuerdo con FAO, los suelos que se encuentran en la cuenca son Cambisol dístico, Andosol húmico y Luvisol Crómico.

Inundaciones y movimientos en masa. En épocas recientes, hay dos eventos significativos que perjudicaron considerablemente la región. El primero se presentó en septiembre de 1998 provocado por lluvias torrenciales, originando inundaciones, deslizamientos y la formación de cárcavas, con un saldo de 39 municipios afectados, 119 decesos (Figura 5.5) y 16,700

damnificados. Además se colapsaron 12 puentes, se afectaron 712 km de la Carretera Costera, el 50% de los caminos rurales y 25 mil viviendas en las regiones Soconusco, Fraylesca, Sierra e Istmo-Costa del Estado (Bitrán, 2001).



Figura 5.5 Mapa de víctimas por las lluvias en Chiapas (Periódico El Universal 17/09/99)

El segundo evento desastroso ocurrió en octubre de 2005 cuando una combinación de varios sistemas meteorológicos, entre ellos la disipación del huracán Stan, proveniente del Golfo de México (Figura 5.6), “provocó que durante varios días consecutivos se presentaran lluvias extremadamente intensas en el estado de Chiapas, que originaron el desbordamiento de varios ríos, inundaciones, corrientes de lodo y deslaves en gran parte del territorio Chiapaneco” (CENAPRED, 2006).

El fenómeno provocó el desbordamiento de 98 ríos, afectando a 800 localidades de 41 municipios. Ocasionó el deceso de 86 personas y numerosas pérdidas que ascendieron a más de 15 mil millones de pesos. Además, el impacto del fenómeno meteorológico causó mayores perjuicios en la infraestructura social (daños en vivienda, salud, educación e

infraestructura hidráulica), que en la económica (Tabla 5.1), al representar cerca del 40% del total de los daños registrados (Ibid).

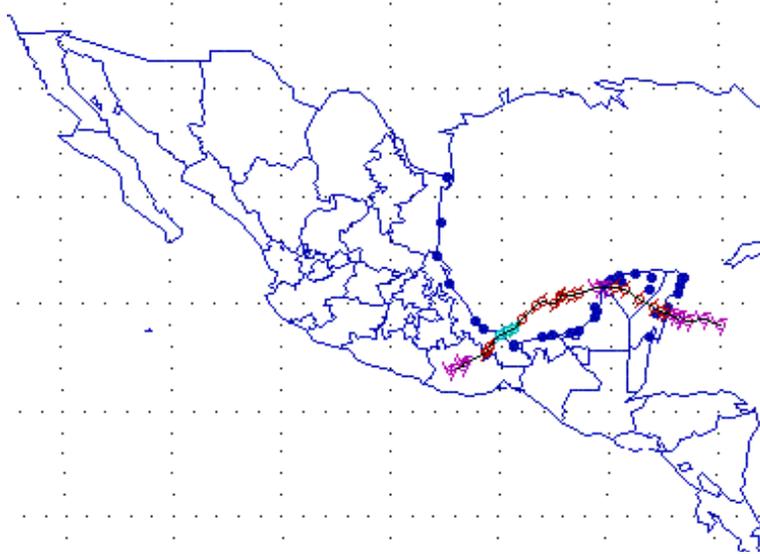


Figura 5.6 Trayectoria del huracán “Stan” del océano Atlántico (1-5 octubre, 2005)

Para apreciar la magnitud del costo de los daños, baste señalar que éste duplica el monto que en promedio han ocasionado históricamente en todo el país los desastres, que es de aproximadamente 7,500 millones de pesos (alrededor de 700 millones de dólares). Por otro lado, si se compara el monto de los daños con el producto bruto del estado, es una cifra ligeramente superior al 5%, lo que da también una idea de la gravedad de los perjuicios causados en la economía del estado (CENAPRED, 2006).

5.2 Marco teórico

5.2.1 Plataforma GIS de modelado hidrológico AGWA

El modelo hidrológico Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) (Evaluación Geoespacial Automatizada de la cuenca), es una herramienta con interfase GIS (ArcView o Arc Gis), que funciona como un sistema de análisis hidrológico para múltiples propósitos usado por expertos en el manejo de cuencas, recursos naturales y uso

de suelo, así como por científicos que desarrollan estudios tanto en cuencas grandes como en cuencas pequeñas (Miller et al., 2002; <http://www.epa.gov/nerlesd1/land-sci/agwa/>; <http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/>). AGWA fue diseñado por investigadores del Agricultural Research Service, ARS (Servicio de Investigación en Agricultura) del U.S. Department of Agriculture, USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), en cooperación con la Oficina de Investigación y Desarrollo de la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), para cubrir con los siguientes objetivos (Scott et al., 2006):

Tabla 5.1 Resumen de daños

Concepto	Daños directos (miles de pesos)	Daños indirectos (miles de pesos)	Total (miles de pesos)	Porcentaje del total
Infraestructura social				
Vivienda	1,408,606	169,000	1,577,606	10.5
Educación	158,338	87,203	245,541	1.6
Salud	70,532	2,116	72,648	0.5
Infraestructura hidráulica CONAGUA	2,020,731	1,970,375	3,991,106	26.6
Subtotal	3,658,207	2,228,694	5,886,901	39.2
Infraestructura económica				
Sector eléctrico	136,871	117,965	254,836	1.7
Comunicaciones y transportes Infraestructura urbana (Obras Públicas)	3,591,428	164,576	3,756,004	25.0
Subtotal	4,407,368	285,816	4,693,185	31.2
Sectores productivos				
Sector agropecuario	414,110	2,666,987	3,081,097	20.5
Turismo	3,608	110	3,718	0.0
Comercio e industria	303,692	0	303,692	2.0
Subtotal	721,410	2,667,097	3,388,507	22.5
Atención a la emergencia	0	298,250	298,250	2.0
Medio Ambiente	0	764,500	764,500	5.1
Total general	8,786,985	6,244,357	15,031,343	100.0

Fuente: elaboración CENAPRED, con información de las diferentes dependencias involucradas.

- i. Proveer de un método simple, directo e iterativo para la parametrización del modelado hidrológico
- ii. Brindar el uso básico accesible de datos GIS

- iii. Ser compatible con otros paquetes de análisis geoespacial en ambientes basados en el concepto de cuenca.
- iv. Ser útil en el desarrollo de escenarios y en el trabajo de simulación de alternativas a futuro a diversas escalas de análisis de la cuenca

AGWA fue diseñado para sustentar la evaluación del terreno y paisaje bajo diferentes escalas espacio-tiempo, y ofrece la funcionalidad de conducir todas las etapas de evaluación de la cuenca por medio de dos modelos hidrológicos, el modelo Soil & Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 1994) y el KINEmatic Runoff and erOSion Model (KINEROS2 en la versión para AGWA que para fines prácticos se seguirá denominando KINEROS) (Smith et al., 1995) (Kepner et al, 2004).

SWAT (Herramienta de evaluación de agua y suelo) es un modelo hidrológico distribuido de simulación continua, desarrollado por ARS, USDA, para simular eventos a largo plazo (mayores a 1 año), en cuencas mayores de 100 km². Utiliza valores promedio diarios como datos de entrada y no está diseñado para simular a detalle el tránsito de avenidas de un evento en particular. El modelo es distribuido y de parámetros masivos, diseñado para predecir el impacto del manejo del agua, sedimentos y descarga de químicos en la agricultura, en cuencas no instrumentadas grandes y complejas con variedad de suelos, uso de suelo y condiciones de manejo durante grandes períodos de tiempo. Los componentes de SWAT pueden agruparse en ocho secciones principales: hidrología, clima, erosión, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de la planta, nutrientes, pesticidas, y prácticas de manejo. Los procesos hidrológicos principales que realiza SWAT son clima, flujo superficial, pérdidas de transmisión y descarga de sedimentos (Goodrich, 2000). En Número de Curva es usado para calcular la lluvia en exceso, y el flujo en canales es transitado por medio del método del coeficiente variable de almacenamiento (Scott et al., 2006). Para mayor información sobre SWAT se puede consultar la página web <http://swat.tamu.edu/>.

Por otro lado, KINEROS (Modelo cinemático de escurrimiento y erosión), también desarrollado por ARS, USDA, es un modelo hidrológico de base física, diseñado para

cuenca pequeñas agrícolas o urbanas (menores o iguales a 100 km²), con clima árido y semiárido, que simula el flujo superficial y erosión provocado por eventos aislados de tormenta (Scott et al., 2006, Woolhiser et al., 1990). Describe los procesos de interceptación, infiltración, flujo superficial y erosión. La cuenca es representada por una serie de planos (flujo en laderas) y canales (tramos de río), donde el movimiento del agua es modelada en forma de cascada (Nearing, 2005). KINEROS también permite determinar los efectos de varios rasgos artificiales de la cuenca como son los desarrollos urbanos, pequeños embalses, o canales rectificadas.

AGWA combina ambos modelos (SWAT y KINEROS) en una interfase intuitiva para realizar la evaluación de la cuenca con cambios a diferentes escalas, según sea necesario, proporcionando al usuario resultados consistentes y reproducibles (Miller et al, 2002). Hernández y Goodrich, 1998, combinaron ambos modelos para identificar los problemas hidrológicos y ecológicos de la cuenca del Río San Pedro usando SWAT, y la cuenca experimental de Walnut Gulch dentro de la misma cuenca del Río San Pedro, usando KINEROS. Éste fue el comienzo de AGWA.

5.2.1.1 Parámetros de entrada y tareas que ejecuta AGWA- KINEROS

Los requerimientos para correr AGWA-KINEROS (también AGWA-SWAT), incluyen el modelo digital de elevación (MDE), grid de uso/cobertura de suelos, shape (polígono) de suelos y datos de precipitación. Los parámetros de entrada se obtienen directamente de estos datos, al usar tablas de consulta optimizadas que se proporcionan como herramienta (Kepner, 2004).

Específicamente para el caso del modelo KINEROS, la información necesaria para aplicarlo es de dos tipos, la información “requerida” que debe estar disponible al momento de iniciar la aplicación del modelo, y la información “generada u opcional” que es creada por AGWA durante su aplicación o es generada previamente por otro modelo, y que se incorpora como dato. La información se ingresa en tres formatos: Grid o Grilla (raster), Temas (shapefiles) y Tablas (extensión dbf), como se indica en la Tabla 5.2 (Scott et al., 2006; Arbuet, 2009).

Tabla 5.2 Tipo de información necesaria para correr el modelo AGWA-KINEROS

Nombre	Clase	Formato	Información
Cuenca			
MDE	Requerida	Raster	Proporcionada por el usuario
Dirección de flujo	Opcional	Raster (enteros)	Creada por AGWA o previamente por otro modelo
Flujo acumulado	Opcional	Raster (enteros)	Creada por AGWA o previamente por otro modelo
Red de drenaje	Opcional	Raster (0-1)	Creada por AGWA o previamente por otro modelo
HGR (*) (Relaciones hidráulicas geométricas)	Requerida	Tabla (dbf)	Proporcionada por el modelo, puede ser modificada por el usuario
Uso de suelo			
Mapa uso del suelo	Requerida	Raster (enteros)	Proporcionada por el usuario
Nalc_lut (*) (Tabla de consulta)	Requerida	Tabla (dbf)	Proporcionada por el modelo, puede ser modificada por el usuario
Suelo			
Mapa de suelo	Requerida	Shapefile (polígono)	Proporcionada por el usuario
Base de datos suelos FAO: FAO_summ (*) FAO_World (*) FAO_properties (*)	Requeridas	Tabla (dbf)	Proporcionada por el modelo, puede ser modificada por el usuario
kin_lut (*) (Tabla de consulta)	Requerida	Tabla (dbf)	Proporcionada por el modelo
Temp_soil_lut	Creado temporalmente	Tabla	
Temp_soil_kin	Creado temporalmente	Tabla	

(*) tablas incluidas en el archivo *datafiles* del modelo AGWA

Las tareas necesarias para conducir la evaluación de la cuenca se pueden agrupar en cinco pasos: 1) identificación del lugar y delimitación de la cuenca (Delineate Watershed); 2) subdivisión de la cuenca (Delineate Watershed); 3) parametrización del uso/cobertura del suelo y suelos (Run Land Cover and Soils Parameterization); 4) preparación de los archivos de entrada de lluvia y otros parámetros (Write KINEROS/SWAT Precipitation File ; y 5) ejecución del modelo y visualización de resultados (Write Output Files(s) and Run KINEROS/SWAT, View KINEROS/SWAT results) (Kepner, 2004). Dichas tareas aparecen en el menú llamado AGWA Tools, una vez que se ha creado un proyecto en AGWA (Figura 5.7). La versión del modelo AGWA que se ocupó en el presente trabajo fue la 1.5 Beta, y es de libre acceso en:

<http://www.epa.gov/nerlesd1/land-sci/agwa/>; <http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/>.

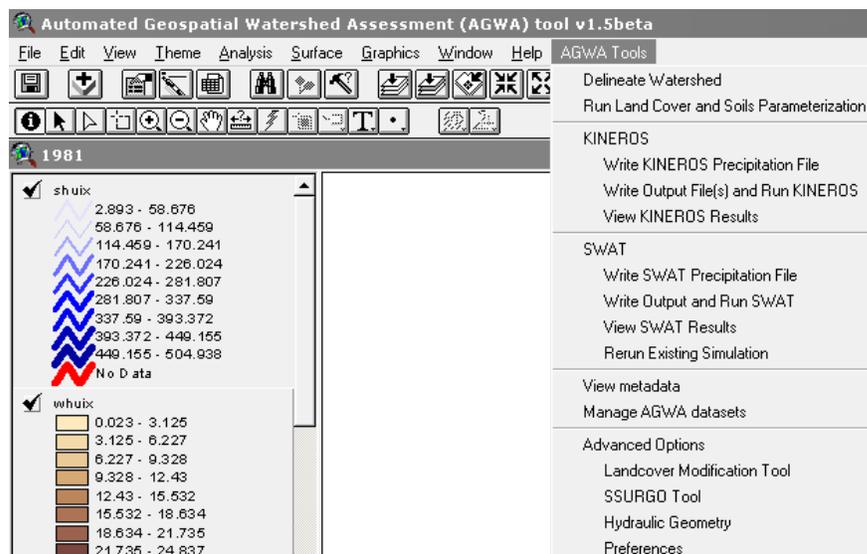


Figura 5.7 Tareas que realiza AGWA en el menú AGWA Tools en Arc View 3.2

En la Figura 5.8 se muestra de una manera más ilustrativa los pasos que se realizan al correr AGWA-KINEROS. A continuación se explica cada paso:

- a) **Delineación y discretización de la cuenca.** En primer lugar se introduce el modelo digital de elevación de la cuenca en estudio y se asigna un punto de salida, para así obtener el partaguas de la cuenca y posteriormente desagregarla (discretizarla) en

elementos, en el entendido de que esto significa descomponer la cuenca en planos (flujo en laderas) y canales (tramos de río).

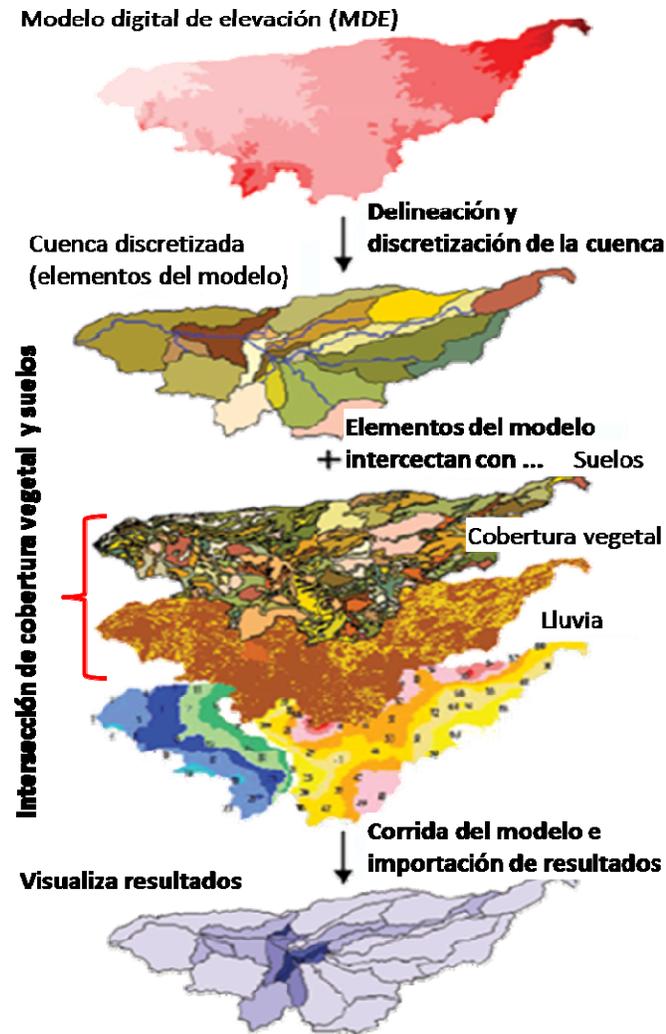


Figura 5.8 Datos de entrada y tareas que ejecuta AGWA-KINEROS

En cuanto a la desagregación de la cuenca en la parte correspondiente a elementos-canal, el programa asigna valores por default a ciertos parámetros, los cuales se muestran en la Tabla 5.3.

La desagregación de la cuenca se realiza con la ayuda del parámetro *valor del umbral del área de contribución* (Contributing Area Threshold Value, CSA), fijado por el usuario. AGWA permite generar automáticamente distintos niveles de desagregación

espacial de la cuenca por medio de dicho parámetro, cuyo valor es ingresado por el usuario como porcentaje de la superficie total de la cuenca o como superficie en hectáreas. Este parámetro representa el límite a partir del cual una celda comienza a formar parte de la red de drenaje. Cuanto menor es el valor de CSA las celdas drenan con menor acumulación de flujo, la red de drenaje se representa con mayor grado de detalle y se genera una mayor número de elementos (Goodrich et al, 2005; Arbuét, 2009). Basado en la experiencia, un valor del 2.5% de CSA del área total de drenaje de la cuenca es típicamente suficiente para un análisis preliminar de ésta (Goodrich et al, 2005).

Tabla 5.3 Valores asignados por default a ciertos parámetros obtenidos al discretizar la cuenca en elementos-canal

Parámetro	Descripción	Valor
MAN	Coeficiente de rugosidad de Manning	0.035
SS1	Talud margen izquierda	1
SS2	Talud margen derecha	1
CV	Coeficiente de variación de KSAT	0
KSAT	Conductividad hidráulica saturada	210 mm/hr
G	Tensión capilar media	101 mm
DIST	Índice de distribución del tamaño de los poros	0.545
POR	Porosidad	0.44 cm ³ /cm ³
PCT_CLAY	Fracción de arcilla (0-1)	0.05
PCT_SILT	Fracción de limo (0-1)	0.05
PCT_SAND	Fracción de arena (0-1)	0.90
SP	Coeficiente de salpicadura	63
COH	Coeficiente de cohesión del suelo	0.005

En cuanto a las relaciones hidráulicas que el programa maneja, AGWA tiene por default 2 relaciones geométricas obtenidas en North Carolina's Coastal Plain y Walnut Gulch Watershed de Arizona, cuyos parámetros están definidos en la tabla HGR. Estas relaciones geométricas son representativas de cursos de regiones semiáridas. Para el caso de la cuenca del Río Huixtla, se mantuvieron las mismas relaciones en el entendido de que el curso del Río Huixtla tiene aproximadamente las

mismas características geométricas que la cuenca de Walnut Gulch (conclusión derivada de plática con investigador que conoce ambas cuencas).

b) Parametrización del uso/cobertura del suelo y suelos. Una vez delineada y discretizada la cuenca, el programa procede a parametrizar el grid de uso/cobertura del suelo y el shape de suelos, con los elementos de la cuenca, esto es intersectarlos entre sí para obtener los parámetros hidrológicos de cada elemento. En la Tabla 5.4 se presentan dichos parámetros (Scott et al., 2006; Arbuet, 2009).

Tabla 5.4 Parámetros obtenidos para cada elemento-plano de la cuenca durante la parametrización del grid de uso/cobertura del suelo y el shape de suelos

Parámetro	Descripción	Origen
INT	Altura de intercepción (mm)	Uso del suelo
COVER	Fracción de superficie cubierta por uso del suelo (%)	Uso del suelo
MANN_n	Coefficiente de rugosidad de Manning para la cuenca	Uso del suelo
PCT_IMPERV	Porcentaje Impermeable (%)	Uso del suelo
PAVE	Fracción de superficie erosionable (0-1)	Tipo de suelo
SPLASH	Coefficiente de salpicadura	Tipo de suelo
ROCK	Fracción volumétrica de roca	Tipo de suelo
KS	Conductividad Hidráulica Saturadada (mm/hr)	Tipo de suelo
G	Tensión capilar media (mm)	Tipo de suelo
POR	Porosidad (ϕ)(cm ³ /cm ³)	Tipo de suelo
SMAX	Máxima Saturación relativa	Tipo de suelo
CV	Coefficiente de variación de KS	Tipo de suelo
PCT_SAND	Fracción de arena (0-1)	Tipo de suelo
PCT_SILT	Fracción de limo (0-1)	
PCT_CLAY	Fracción de arcilla (0-1)	
DIST	Índice de distribución del tamaño de los poros (λ)	Tipo de suelo
COHESION	Coefficiente de cohesión del suelo	Tipo de suelo

Para lograr este propósito, el modelo se auxilia de tablas de consulta (**look up tables = lut**) para cada capa intersectada.

Tabla de consulta *nalc_lut.dbf* (north american landscape characterization= nalc) para el grid uso/ cobertura del suelo. Dicha tabla contiene los valores correspondientes a intercepción (INT), porcentaje de cobertura vegetal (COVER), coeficiente de Manning (N) y porcentaje de la cuenca cubierta con materiales

impermeables (IMPERV), para cada tipo de vegetación y uso de suelo existente en la cuenca en estudio. También contiene el número de curva que le corresponde a cada grupo hidrológico de suelos (A, B, C y D), necesarios para correr AGWA-SWAT. Esta tabla contiene por default los valores asignados a la cuenca semi-desértica San Pedro, éstos fueron estimados de acuerdo con la opinión de expertos y con tablas de consulta previamente publicadas en Woolhiser et al., 1990 (Miller et al., 2002). Por esta razón la tabla *nalc_lut.dbf* tuvo que ser modificada para describir los tipos de uso/cobertura del suelo, según la clasificación definida para la cuenca del Río Huixtla.

Tabla de consulta *kin_lut.dbf* (kineros) para el shape de suelos. Los parámetros contenidos en dicha tabla se derivaron del manual de KINEROS (Woolhiser et al., 1990) y de Rawls et al., 1982. AGWA recurre a ella para obtener parámetros de suelo necesarios que no se encuentran en la base de datos del programa. Varios de estos parámetros son modificados por AGWA para evitar errores y mejorar estimaciones. Las texturas enlistadas en dicha tabla se refieren a las texturas pertenecientes a los componentes de suelo según la clasificación de suelos de Estados Unidos (STATSGO y SSURGO) (Scott et al., 2006). Otras texturas fueron adicionadas para acomodar la base de datos según la clasificación de suelos de FAO (Levick et al., 2004). A este respecto, los mapas de FAO se encuentran a una escala 1: 5,000,000, y a pesar de su resolución baja, los resultados obtenidos con KINEROS, usando los suelos de FAO, son comparables con los resultados obtenidos con mapas de Estados Unidos que tienen mucho mejor resolución (Levick et al., 2004).

En el caso de usar la base de datos de suelo de FAO, AGWA se auxilia con las tablas *FAO_World*, *FAO_Properties* y *FAO_Summ*. En primer lugar, el modelo busca el identificador de cada tipo de suelo (SNUM) en el shapefile de suelos y establece una relación con la tabla *FAO_World*, que contiene las unidades de suelo. En seguida se relaciona con la tabla *FAO_Properties*, después con la tabla *FAO_Summ* y finalmente la tabla *kin_lut*. Ésta última asocia la textura con parámetros hidráulicos del suelo, como conductividad hidráulica saturada, tensión capilar media, porosidad,

índice de distribución del tamaño de los poros y coeficiente de variación de la conductividad hidráulica saturada.

- c) **Generación de archivos de precipitación.** En el caso de AGWA-KINEROS, existen varias opciones para generar apropiadamente la precipitación en el formato establecido para KINEROS. El usuario puede seleccionar entre cinco opciones: 1) *Generación de un evento usando mapas de precipitación-frecuencia*, 2) *Uso de un evento generado por la base de datos de lluvias de diseño con que cuenta AGWA*, 3) *Insertar un evento de manera manual*, 4) *Generación de un evento a partir de la profundidad de lluvia con período de retorno único*, 5) *Generación de uno o más eventos para una o más estaciones con registro de lluvia* (Scott et al., 2006).

De lo anterior, se puede constatar que los archivos de precipitación de entrada del modelo pueden ser escritos para una lluvia uniforme (una sola estación) o para una lluvia distribuida (múltiples estaciones), con opción de generar hietogramas de tormentas de diseño o bien para una tormenta en particular. La elección de la opción a utilizar depende de lo que se planea simular en la cuenca de estudio y de la información de precipitación que se tenga disponible. Dado que el propósito del presente trabajo es calibrar el modelo KINEROS en una cuenca semi-instrumentada, es decir, una cuenca con información de precipitación diaria en una sola estación, la elección se limita a la opción 3) *Insertar un evento de manera manual* o bien 4) *Generación de un evento a partir de la profundidad de lluvia con período de retorno único*

El formato para la creación del archivo de lluvia usando esta opción, consiste en representar a la tormenta de interés en pares tiempo (min)- altura de lluvia acumulada (mm o pulg) o en pares tiempo-intensidad (mm/min). Los pares tiempo-altura de lluvia definen simplemente el total de la lluvia acumulada hasta ese tiempo transcurrido respecto a la duración total de la tormenta. Los pares tiempo-intensidad definen la tasa de cambio de la lluvia hasta el siguiente dato-par. Si se tienen disponibles los datos en forma de par tiempo-altura de lluvia, no existe ninguna

necesidad que el usuario los convierta a intensidad, pues el programa convierte las intensidades a altura de lluvia acumulada. Por otro lado, AGWA modela la lluvia espacialmente uniforme sobre cada elemento, y solamente varía entre elementos cuando existe más de una estación de lluvia (Semmens, 2008).

Esta opción no es recomendable para eventos de larga duración y la duración total no debe exceder las 48 horas (Scott et al., 2006). Independientemente del intervalo de tiempo que se decida utilizar, uno o varios minutos, la construcción del hietograma está limitado a 200 puntos de cambio (Bosley, 2008). Así por ejemplo, si se tienen mediciones de lluvia cada 5 minutos; entonces, para cumplir con el límite de 200 puntos de cambio, las tormentas elegidas no deben exceder 16.67 horas de duración de tormenta total (5 minutos por 200 pasos entre 60 minutos).

La escala temporal del modelo KINEROS maneja generalmente tiempos menores a 1 minuto hasta varios minutos, considerando este rango como intervalos de tiempo apropiados para la naturaleza de los procesos que el modelo simula (eventos de tormenta) (Texas Univ., 1999). Este funcionamiento del modelo indica que no es adecuado hacer simulaciones de varios días (más de dos), pues el modelo está hecho para trabajar con tormentas aisladas.

El archivo de precipitación (*.pre) puede ser creado dentro del menú de herramientas de AGWA o bien puede ser creado fuera de AGWA, siempre y cuando tenga el formato correcto, el cual puede consultarse en <http://tucson.ars.ag.gov/KINEROS> (Scott et al., 2006). Dentro de este archivo se debe incluir el índice de saturación, S_i , un parámetro requerido por AGWA, básico para la calibración, el cual depende de cada condición antecedente de humedad para cada evento de tormenta, por lo que debe ser ajustado para cada evento tomando en cuenta la lluvia de 5 días antes del evento de tormenta (Kalin et al., 2003).

- d) Corrida de simulación.** Una vez que se han completado los datos de entrada, es decir, que la cuenca ha sido delimitada y ha sido subdividida en elementos, que se

han determinado los parámetros hidrológicos para cada elemento y se ha creado el archivo de precipitación; entonces el usuario puede proceder a correr AGWA, en su interfase KINEROS, dándole un nombre a la simulación que crea el programa. En esta etapa el modelo genera un archivo de parámetros (*.par) con el nombre que el usuario asigna para este propósito, y lo crea a partir de los datos de las subcuencas (plane element) y los segmentos de canal (channel element), como las características físicas, de suelos y de usos/coberturas del suelo que ya fueron incorporadas en los atributos de los shapefile correspondientes.

En el mismo panel donde se genera el archivo de parámetros, se tiene la opción de elegir crear un archivo con información del hidrograma del canal de salida, y también existe el panel de los multiplicadores (Figura 5.9), el cual representa una opción que ofrece el programa para ajustar algunos parámetros de los elementos –plano y canal-, al multiplicar éstos por un valor constante. Dichos valores sirven para calibrar la simulación. El rango de los multiplicadores varía entre -5 y 5, sin contar el cero.

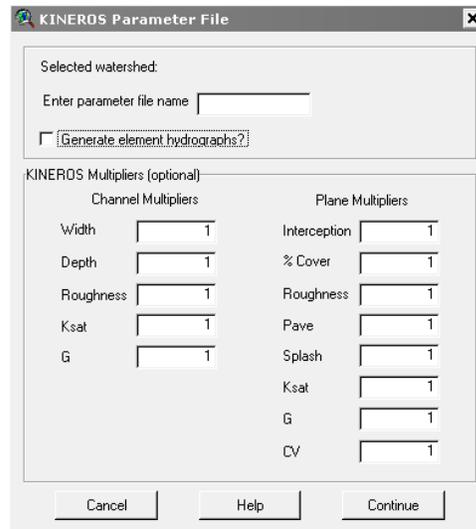


Figura 5.9 Vista del menú para generar el archivo de parámetros con la opción de aplicar los multiplicadores

- e) **Visualización de resultados.** AGWA importa los resultados del modelo y los agrega a los mapas correspondientes a los elementos -plano y canal-. Dichos resultados pueden ser visualizados en la cuenca en estudio, ello permite identificar áreas con problemas de manera rápida y efectiva. Los resultados o datos de salida que se pueden obtener con KINEROS, tanto para canales como para planos, se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Variables de salida que ofrece KINEROS

Infiltración Infilt_m: Infiltración (mm) Infilt_e: Infiltración (in)
Escurrimiento Runoff_mm: Escurrimiento directo (mm) Runoff_m3: Escurrimiento directo (m3)
Producción de sedimento Sed_out: Sedimento anual (kg)
Gasto pico Pflow_m3s: Caudal máximo (m ³ /s) Pflow_mmh: Caudal máximo (mm/hr)
Descarga pico de sedimentos PSedQ_kgs: Caudal máximo sólido (kg/s)
Otros Z_change: socavación en el canal (mm/m ²) Percent Error: error en el balance de volúmenes (%)

5.2.2 Modelo hidrológico KINEROS2

5.2.2.1 Descripción del modelo

El modelo hidrológico KINEROS o KINEROS2 en su versión para AGWA, fue desarrollado por el Servicio de Investigación en Agricultura de USDA (ARS). Este software es de dominio público y se puede descargar del sitio www.tucson.ars.ag.gov/kineros. La versión original del modelo fue desarrollada por Woolhiser et al., 1990. Varios estudios fueron realizados desde los inicios de KINEROS en la cuenca experimental de Walnut Gulch Experimental Watershed perteneciente a USDA-ARS, una cuenca semi-árida compuesta de 11 cuencas anidadas con áreas que

varían entre de 2.3 km² a 148 km², junto con 13 cuencas pequeñas adicionales que varían de 0.004 km² a 0.89 km². La variabilidad espacial de la lluvia es medida por medio de una red de 89 estaciones (Miller et al., 2002).

KINEROS es un modelo hidrológico distribuido, orientado a eventos aislados de tormenta, de base física, que describe los procesos de flujo superficial y erosión en cuencas pequeñas agrícolas o urbanas (menores o iguales a 100 km²) (Woolhiser et al., 1990). La cuenca es representada por una serie de planos (flujo en laderas) y canales (tramos de río), donde el movimiento del agua es modelada en forma de cascada (Nearing, 2005) y por esta razón se le considera modelo distribuido. Es orientado a eventos aislados de tormenta porque no tiene componentes que describan la evaporación y el movimiento del agua en el suelo entre tormentas, por lo tanto no puede mantener el balance hídrico entre estas. Dadas las condiciones iniciales de humedad del suelo, el modelo puede calcular el flujo superficial y erosión para un evento de tormenta. Por último, es un modelo de base física porque los modelos matemáticos para describir sus componentes se basan en principios físicos como la conservación de masa y momentum (Woolhiser et al., 1990).

Por otro lado, KINEROS también permite determinar los efectos de varios rasgos artificiales de la cuenca como son los desarrollos urbanos, pequeños embalses, o canales rectificadas.

El modelo asume que el flujo es generado por el mecanismo Hortoniano, esto es, cuando la tasa de lluvia excede la capacidad de infiltración, por lo que el modelo no es apropiado para cuencas con un componente significativo de flujo subsuperficial (Woolhiser et al., 1990).

Dado que KINEROS se basa en las ecuaciones de onda cinemática, aplica dos tipos de simplificaciones: una geométrica y otra de procesos (Arbuet, 2009).

En cuanto a la representación geométrica de la cuenca que KINEROS realiza, la transforma y simplifica en una red equivalente, compuesta por superficies de flujo o planos, que interceptan canales (o conductos en el caso de drenes urbanos), lagunas o presas de almacenamiento. Cada uno de éstos se orientan de tal manera que el flujo es unidimensional, donde cada unidad se le denomina *elemento* perteneciente a la red mencionada cuya forma es de cascada (Figura 5.10) (Smith et al., 1995). El objetivo es que a través de la red de planos y canales se preserven las variaciones espaciales más significativas de topografía, suelos, cobertura vegetal y precipitación (Woolhiser et al., 1990).

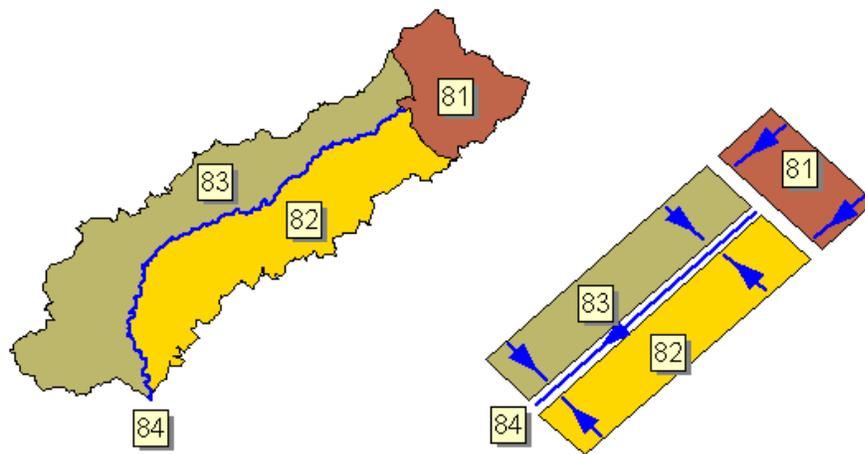


Figura 5.10 Ilustración esquemática de la abstracción realizada por KINEROS a una cuenca, a través de una red de planos y canales que representan la trayectorias de flujo dentro de la cuenca (Arbuet, 2009)

Las superficies o planos pueden ser permeables o parcialmente impermeables (por ejemplo el caso de techos y calles en una cuenca urbana). Así mismo, los canales pueden ser permeables con una geometría trapezoidal simple o compuesta (Smith et al., 2000).

El flujo Hortoniano es entonces simulado por esta red de elementos, culminando en la producción de un hidrograma simulado a la salida de la cuenca. Los procesos simulados por el modelo para generar la ocurrencia de escurrimiento-erosión en la cuenca se describen en el subcapítulo 5.2.2.3.

5.2.2.2 Componentes de KINEROS

- a) Trabaja en cuencas pequeñas menores o iguales a 100 km².
- b) Trabaja con eventos aislados de tormenta
- c) Simula procesos de intercepción, infiltración, flujo y erosión
- d) Determina efectos causados por desarrollos urbanos, embalses pequeños de retención o canales revestidos
- e) Posibilita el seguimiento de las mejores prácticas de manejo/uso de suelo (BMP) en impactos aguas abajo

5.2.2.3 Procesos simulados por KINEROS

Los procesos que simula el modelo se pueden agrupar en lluvia, intercepción, infiltración, flujo superficial, flujo en canal y erosión. Para una descripción detallada sobre estos procesos se puede consultar Woolhiser et al., 1990, Smith et al., 1995 y Semmens et al., 2008.

- a) LLUVIA (lo que se escribe a continuación se complementa con la parte que se comentó sobre lluvia en el subcapítulo 2.2.1). KINEROS puede usar tanto lluvia uniforme como lluvia distribuida como datos de entrada, y se provee en forma de hietogramas para uno o más puntos (Miller et al., 2002). Tiene un interpolador de lluvia que ha sido especialmente desarrollado en el espacio-tiempo que permite un tratamiento correcto de tormentas de gran intensidad de lluvia. Si llegara a aplicarse este modelo en cuencas mayores a 1000 ha, la falta de una distribución adecuada de la lluvia, daría resultados comparables a un modelo simple que no vincula una caracterización detallada de la cuenca como la requerida con los datos de entrada de KINEROS (Goodrich et al., 2000).

La información de la variable de entrada de lluvia puede provenir de hasta 100 estaciones dentro o cercanas a la cuenca, sin embargo, para eventos de tormenta grandes, este número debe ser reducido para asegurar que el número total de pares tiempo-altura de lluvia, no excedan los 5000 (Scott et al., 2006). KINEROS requiere

de dicha información en forma de pares de lluvia acumulada (mm) con respecto al tiempo (min) o en pares de cambio de intensidad (mm/min) con respecto al tiempo.

En lo que respecta a la lluvia uniforme como dato de entrada, ésta puede ser obtenida ya sea a través de la herramienta de generación de lluvia que ofrece AGWA opción 4) *Generación de un evento a partir de la profundidad de lluvia con período de retorno único*) o bien creando del archivo de lluvia con la opción 3) *Insertar un evento de manera manual*. La lluvia uniforme, aunque es menos apropiada para un modelo cuantitativo de eventos de tormenta aislados, es particularmente útil para la evaluación relativa del cambio de cobertura vegetal en la cuenca en estudio (Miller et al., 2002).

- b) INTERCEPCIÓN. Cuando se presenta una lluvia en una superficie vegetativa, parte de ésta es retenida y colectada por el follaje, por lo que esta cantidad de lluvia retenida no alcanza a la superficie del suelo y no contribuye a la infiltración o al escurrimiento. De acuerdo con esto, la altura de intercepción (I), en mm o in, es sustraída de la lluvia antes de que sea calculada la infiltración (Woolhiser et al., 1990, Hernandez et al, 2000).

El efecto de intercepción es controlado por dos parámetros: la altura de intercepción y la fracción de la superficie cubierta por la vegetación interceptada (COVER). Éste parámetro de altura de intercepción refleja la altura promedio de la lluvia retenida por un determinado tipo de vegetación o por la mezcla de varios tipos de vegetación presentes en la superficie, según se especifique. La taza inicial de lluvia es reducida por la fracción de cobertura del dosel (Semmens, et al., 2008, Scott et al., 2006, Hernandez et al., 2000), por ejemplo, una fracción de cobertura igual a 0.50 da una reducción del 50%, hasta que la cantidad retenida alcanza la altura de intercepción potencial. La nueva lluvia modificada se convierte entonces en el dato de entrada que afectará la superficie del suelo para calcular la infiltración (Semmens, et al 2008, Goodrich et al., 2000).

Estimaciones generales para la intercepción por vegetación son dadas por Woolhiser et al, 1990 en la Tabla 1 del Manual de KINEROS, como una función de la altura del follaje según la cobertura vegetativa. Dicha tabla fue construida con apoyo de datos de intercepción medidos por Horton, 1919 y a partir de la opinión de varios expertos. También se pueden encontrar algunos datos de intercepción para diversos cultivos en Dunne et al., 1978 y sobre bosques en Gregersen et al., 2007.

- c) INFILTRACIÓN. KINEROS2 utiliza la ecuación de Parlange, 1982, para modelar el proceso de infiltración, esta ecuación es una generalización de la ecuación de infiltración Green-Ampt y la de Smith y Parlange (Smith y Parlange, 1978) (Hantush et al., 2005). El modelo de infiltración utilizado originalmente por KINEROS, durante la ocurrencia de lluvia es el de Smith y Parlange, 1978, que se basa en una solución aproximada de la ecuación básica del flujo no saturado (Woolhiser, 1990). El modelo requiere de tres parámetros para describir el comportamiento de la infiltración en el suelo durante un evento de lluvia, por medio de la obtención de la capacidad de infiltración (f_c), mm/hr, la cual se encuentra en función de la infiltración acumulada (I) y del contenido de agua del suelo (θ_i). (Goodrich et al., 2000, Smith et al., 1995).

La capacidad de infiltración es la velocidad máxima con que el agua penetra en el suelo y también se encuentra en función de tres parámetros fundamentales del suelo: la unidad de capilaridad neta efectiva o tensión capilar (G), mm, la conductividad hidráulica saturada (K_s), mm/h, y saturación relativa inicial (S_i), adim.

Además de los tres parámetros anteriormente descritos, KINEROS requiere los siguientes parámetros del suelo para describir las características de la infiltración: porosidad (ϕ), índice de distribución de poros adimensional (λ), coeficiente de variación de la conductividad hidráulica saturada ($C_v(K_s)$) y contenido de rocas grandes (Rock), que representa el volumen sólido de tamaño grande.

La ecuación de Smith y Parlange se define como:

$$f_c = K_s \frac{\exp\left(\frac{1}{B}\right)}{\exp\left(\frac{1}{B}\right) - 1} \quad (1)$$

Donde:

K_s conductividad hidráulica saturada, (cm/min)

B término que combina G con el déficit de saturación del suelo

$$B = (\theta_s - \theta_i)G$$

$(\theta_s - \theta_i)$ déficit de saturación del suelo

θ_s el contenido máximo de humedad del suelo (ligeramente menor que la porosidad del suelo)

G unidad de capilaridad neta efectiva o tensión capilar del suelo, (mm)

$$G = \int_{-\infty}^0 k_r(\varphi)(d\varphi) \quad (2)$$

φ tensión de succión en el frente, (mm)

k_r conductividad hidráulica relativa

$$k_r = \frac{K}{K_s}$$

Existen valores estimados para los parámetros G y K_s para una gran variedad de texturas de suelo obtenidas a través de un estudio estadístico de datos medidos por Rawls et al., 1982, y proporcionadas en el Manual de KINEROS (Woolhiser et al., 1990). Los valores obtenidos deben considerarse como valores de inicio.

La ecuación (1) puede ser usada para calcular la infiltración en canales trapezoidales.

El modelo también considera la infiltración durante la recesión del hidrograma, y la recuperación de la capacidad de infiltración durante la interrupción de la lluvia. Ésta última por medio del algoritmo de redistribución de la humedad del suelo propuesto por Smith et al., 1993.

d) FLUJO SUPERFICIAL Y FLUJO EN CAUCES. Cuando la tasa de lluvia excede la capacidad de infiltración y se almacena una cantidad suficiente de agua en la superficie para vencer los efectos de tensión sobre ésta y llenar las pequeñas depresiones, entonces es cuando comienza el flujo superficial Hortoniano. KINEROS calcula el flujo superficial con las ecuaciones de la onda cinemática como una simplificación de las ecuaciones de Saint Venant y no preservan todas las propiedades de las ecuaciones más complejas, tales como remansos o la atenuación de la onda difusiva. Se ha demostrado que las ecuaciones de la onda cinemática son una excelente aproximación para la mayoría de las condiciones del flujo superficial (Morris y Woolhiser, 1980); sin embargo, como se comentó anteriormente, no pueden ser simulados los remansos, salvo en los embalses (Moral et al, 1995).

Se asume que el flujo en superficies se mueve de forma paralela a un eje, por lo que es tratado como una relación de continuidad dinámica unidimensional (flujo unidimensional), aplicable tanto a flujo superficial como flujo en cauces. La ecuación de continuidad se expresa como (Smith et al., 2000):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_r(x, t) \quad (3)$$

Donde: A área del flujo local o área de la sección transversal
 Q descarga local o descarga del canal por unidad de ancho
 $q_r(x, t)$ entrada lateral neta por unidad de longitud del canal

La ecuación de la onda cinemática es usada tanto para el flujo superficial como para el tránsito en cauces al combinar la ecuación (2) con la relación de flujo normal de Manning para la descarga local $Q(A)$ (caso de flujo en cauces) o velocidad $v(h)$ (caso de flujo superficial), donde h es el almacenamiento unitario del agua (o profundidad media en superficies planas). La solución de la ecuación (2) es obtenida por diferencias finitas en Woolhiser et al., 1990. De esta manera, el modelo obtiene

valores de la velocidad superficial del agua, descarga unitaria, profundidad y ancho del flujo para cada tiempo y punto de la cuenca que servirán para la simulación de la erosión y del transporte de sedimentos. La microtopografía también es considerada en la simulación del escurrimiento a través de la relación $Q(A)$, y también juega un papel en las interdependencias entre el flujo y la infiltración, (Smith et al., 2000).

La forma en que el programa maneja el tránsito en cauces, es a través de los segmentos de canal que reciben como entrada el caudal lateral uniformemente distribuido pero variante en el tiempo, aportado por los planos de uno o ambos lados del canal, por uno o diez canales provenientes del borde de aguas arriba o bien desde un plano proveniente de aguas arriba. Las dimensiones de los planos de escurrimiento se calculan cubriendo completamente la subcuenca, por lo que la lluvia sobre el canal no es considerada directamente (Woolhiser et al., 1990, Semmens et al., 2008, Smith et al., 1995).

- e) EROSIÓN Y SEDIMENTOS (erosión superficial y transporte de sedimentos). El modelo simula el movimiento del suelo erosionado junto con el movimiento del agua en superficie. Toma en cuenta por separado la erosión provocada por la energía de las gotas de lluvia (splash erosion) y aquella provocada por el agua que fluye (hydraulic erosion). La erosión es estimada en los elementos de partes altas, canales y embalses. Procedimientos similares se utilizan para describir el transporte de sedimentos dentro de los elementos del cauce y laderas (Goodrich et al., 2000, Semmens et al., 2008).

Para mayor información sobre estos temas se recomienda revisar Woolhiser et al., 1990, Semmens et al., 2008, Smith et al., 1995, Smith et al., 2000.

5.3 Revisión bibliográfica

KINEROS ha sido aplicado en numerosos estudios, principalmente en cuencas semiáridas en Estados Unidos. Los componentes del tránsito del flujo superficial cinemático y otros precursores a KINEROS fueron probados concienzudamente en las Instalaciones Experimentales de Lluvia-Escurrecimiento (Outdoor Rainfall-Runoff Experimental Facility,

ORREF), de la Universidad del Estado de Colorado. Dichas instalaciones permiten obtener mediciones relativamente precisas de lluvia-escorrentamiento, a una escala comparable a cuencas pequeñas, y ha sido documentada por Dickinson et al., 1967, y Woolhiser et al., 1971. Singh, 1974, al realizar mediciones en dichas instalaciones, encontró que la fórmula de la onda cinemática proporciona una buena descripción del escurrimiento superficial. Otros estudios realizados por Kibler y Woolhiser, 1970, demostraron que la respuesta en una sección convergente, puede ser aproximada adecuadamente por medio de la respuesta de una cascada de superficies rectangulares como lo usa KINEROS. Posteriormente, Zevenbergen y Peterson, 1988, hicieron una comparación entre varios modelos hidrológicos y de erosión para evaluar su respuesta en cuencas pequeñas sujetas a una variedad de eventos de tormenta. Al simular el escurrimiento para cada evento con los modelos ANSWERS, MULTSED y KINEROS (en una versión previa a la liberada al público), los autores encontraron que este último daba una simulación ligeramente mejor a las simulaciones de los otros modelos, y que en general los tres daban muy buenos resultados (Smith et al., 1995).

En 1977 se creó un modelo de computadora denominado KINGEN (Rovey et al., 1977), utilizando los principios del KINEROS, para simular la producción de escurrimiento en cuencas rurales o urbanas usando tormentas de diseño. Desde la publicación de este estudio, varias modificaciones fueron hechas al modelo, dentro de las más significativas se encuentra la inclusión de la simulación de la erosión y en transporte de sedimentos, la revisión del componente de infiltración, y la inclusión del componente-laguna (Woolhiser et al., 1990).

Ya como KINEROS, el modelo fue corrido en la cuenca experimental Walnut Gulch, de clima semiárido, perteneciente a USDA-ARS, abarcando una amplia variedad de tamaños de cuenca entre 0.004 km² y 148 km² (Miller et al., 2002). Las características típicas principales de la cuenca de Walnut Gulch incluyen vegetación de matorral desértico, suelos franco-arenosos con un contenido significativo de roca, y una cantidad importante de superficie de suelo erosionado. Las cuencas están sujetas a una intensidad de precipitación alta (Renard, 1970) (Smith et al., 1995).

Una de las preguntas centrales en la aplicación del modelo distribuido KINEROS es acerca del grado de discretización topográfica. En muchas aplicaciones, los elementos-canal usados son aquellos obtenidos de los mapas que se tienen a la mano. Sin embargo, la representación de la red de arroyos o canales depende en gran medida en la escala del mapa y del juicio cartográfico. Este problema fue tratado por Goodrich, 1991, donde concluyó que el área de soporte del canal promedio igual al 15% (promedio del área aguas arriba donde inicia el canal) era un valor adecuado para preservar la simulación del modelo del flujo superficial en cuencas entre 1.4 y 631 ha. El mismo Goodrich en 1990, examinó la relación entre la resolución espacial del modelo y la exactitud de KINEROS. Demostró que sin calibración, el modelo produce una simulación del escurrimiento apropiado para cuencas pequeñas menores a 0.1 km²). Por otro lado, de acuerdo con Syed, 1999, el modelo digital de elevación usado por USGS de 30 por 30 m, arroja simulaciones aceptables para cuencas de tamaño mediano (~ 100 km²), usando la aproximación de la onda cinemática. Para cuencas más pequeñas, del orden de varias hectáreas, es deseable contar con una mejor precisión en el plano vertical, especialmente cuando el espaciamiento de las celdas es pequeño en la resolución del MDE del plano horizontal.

En estudios posteriores en la cuenca de Walnut Gulch, se calibró y validó el modelo para diferentes tamaños de cuenca, un amplio rango de eventos, condiciones iniciales y complejidad en los patrones de lluvia. Goodrich, 1991, por ejemplo, hizo estudios en 3 subcuencas de Lucky Hills (dentro de Walnut Gulch), con áreas de 0.36, 1.40 y 4.40 hectáreas, donde se encontró que las mejores simulaciones ocurren para eventos grandes y que las peores ocurren para eventos pequeños. Para eventos muy pequeños, la incertidumbre en el error medido puede convertirse en un alto porcentaje en el escurrimiento observado. También, la sensibilidad a cambios en el coeficiente de variación de la conductividad hidráulica saturada CV (K_s) es particularmente aguda para eventos pequeños a medianos cuando la tasa de precipitación interactúa con capacidades de infiltración espacialmente variables. Sin embargo, estos eventos no tienen influencia en la estadística de la eficiencia (E) de la calibración y validación. Para eventos grandes, la variación de K_s (y por lo tanto de las capacidades de infiltración) es dominante para grandes intensidades de lluvia.

En el mismo estudio, Goodrich aplicó KINEROS a una cuenca más grande, de 630 ha, donde al igual que en Lucky Hills, las peores simulaciones ocurrieron en los eventos más pequeños. En ambos casos se utilizó una representación espacial de la lluvia. También se encontró que los resultados obtenidos en la verificación del modelo tuvieron un desempeño pobre el cual es posiblemente atribuido a la discrepancia en las pérdidas en el canal, a las condiciones antecedentes del suelo, así como a la gran variabilidad de lluvia aleatoria.

Al respecto, Goodrich hizo un estudio con los mismos eventos, para evaluar los impactos de la representación de la lluvia espacial, usando una sola estación pluviográfica, lo que implica tener una lluvia uniformemente distribuida. El estudio arrojó que 6 de los 10 eventos calibrados y para eventos medianos y grandes, la representación uniforme sobrestima el volumen del escurrimiento (de 14% a 93%).

Por otro lado, Michaud y Sorooshian, 1992, aplicaron KINEROS a la cuenca completa de Walnut Gulch, con un área de 15,000 ha (150 km²), donde compararon el modelo con dos modelos basados en el Número de Curva del SCS, uno del tipo masivo (lumped) y el otro del tipo distribuido, para casos calibrados y no instrumentados. Los investigadores encontraron que KINEROS es razonablemente certero en la simulación del tiempo al gasto pico, sin embargo, provee simulaciones pobres del gasto pico y volumen de escurrimiento (Miller et al, 2002). En cuanto a la comparación de métodos, se encontró que en el caso de la calibración, el método distribuido del número de curva, con pérdidas en canal, es aproximadamente igual de preciso que KINEROS. Para el caso de una cuenca no instrumentada o no calibrada, KINEROS fue más preciso comparado con el modelo distribuido. Las razones principales que se citan los autores que dieron lugar a simulaciones pobres de escurrimiento, son la estimación pobre de la lluvia y la predicción de la infiltración. A groso modo, el 50 % del error de simulación fue atribuido a la muestra gruesa de lluvia.

A partir de las aplicaciones realizadas de KINEROS, se concluye que este modelo hace un trabajo relativamente bueno al simular escurrimiento y erosión en cuencas con áreas hasta de 10,000 ha (100 km²) (Zevenbergen y Peterson, 1988, Goodrich, 1991). La escala de cuenca que mejor simula KINEROS es de 5 ha (0.05 km²). Las simulaciones que fueron

extremadamente pobres condujeron a la revisión de los datos originales de lluvia y gráficas de los hidrogramas. Se detectaron numerosos casos en la instrumentación de la estación o errores en el procesamiento de los datos, así como correcciones impropias de tiempo. Para cuencas mayores a las 10,000 ha (100 km²), la aplicación de un modelo tan detallado como KINEROS, y ante la falta de una distribución adecuada de la lluvia, daría resultados comparables a un modelo simple que no vincula una caracterización detallada de la cuenca como la requerida con los datos de entrada de KINEROS (Goodrich et al., 2000, Smith et al., 1995).

En estudios más recientes (Kalin et al., 2003, Hantush et al, 2005, Kalin et al., 2006), se asevera que la calibración del escurrimiento obtenido con KINEROS2 debe iniciarse con el coeficiente de Manning, tanto en planos (n_p) como en canales (n_{ch}), para ajustar el tiempo de los hidrogramas. En segundo lugar deben calibrarse los parámetros de la conductividad hidráulica saturada (K_s), la unidad de capilaridad neta efectiva o tensión capilar (G) y saturación relativa inicial o índice de saturación (S_i), para ajustar el volumen de los hidrogramas. En Texas Univ., 2008, se menciona que si no se realiza una calibración con los datos observados, utilizados en AGWA ya sea por SWAT o KINEROS, no se recomienda usar los valores absolutos de salida del modelo para propósitos de diseño ni de regulación.

Por otro lado, al realizar el análisis de sensibilidad de los parámetros que utiliza KINEROS tanto para simular escurrimiento como producción de sedimentos, se encontró que S_i es altamente sensible y que puede tener una influencia significativa en la incertidumbre de los datos predictivos del modelo (Hantush et al., 2005). Adicionalmente, entre todos los parámetros, dicho parámetro es el más dinámico ya que depende de las condiciones locales climáticas precedentes al evento por simular. Kalin et al., 2006, con el fin de minimizar dicho efecto, los eventos que utilizaron para validar, fueron seleccionados de tal manera que las condiciones iniciales de saturación fueron secas. Encontraron que los eventos simulados tanto para calibración como para validación de KINEROS2 se comportan claramente mejor cuando el suelo en dichos eventos es inicialmente seco y no se tienen cultivos en el campo. Por lo tanto, llegaron a la conclusión de que KINEROS2 es menos confiable bajo condiciones de humedad iniciales, debido a la dificultad de estimación de los contenidos de humedad

iniciales. Si se cuenta con datos confiables de dicho parámetro (por ejemplo obtenidos con percepción remota), entonces la aseveración anterior no aplica. También el modelo puede presentar resultados pobres cuando existen cultivos en el campo. El estudio realizado por Kalin et al., 2006, se llevó a cabo en la cuenca experimental establecida por USDA en 1964, en Treynor, Iowa, con un área de 13.6 ha. Es importante mencionar que aun cuando KINEROS2 considera la distribución de la humedad del suelo, ignora la evapotranspiración. Por lo tanto, este modelo no es adecuado para simulaciones continuas ya que no es posible un verdadero balance hídrico (Kalin et al, 2003).

En el trabajo realizado por Hantush et al., 2005, en una cuenca experimental de 33.6 ha en Treynor, Iowa, el método de Montecarlo es usado para evaluar la sensibilidad de los parámetros y la incertidumbre en la predicción de los eventos estudiados por KINEROS2 en cuencas pequeñas experimentales. Encontraron que los parámetros que presentan la mayor incertidumbre en los datos de salida, no son necesariamente los más sensibles. Los autores estudiaron la incertidumbre en las variables de salida de gasto pico, volumen total de escurrimiento, gasto pico de sedimentos y descarga de sedimentos con respecto a los parámetros de entrada del modelo, resultó que los parámetros de conductividad hidráulica saturada (K_s) y la unidad de capilaridad neta efectiva o tensión capilar (G), seguida por el índice de saturación (S_i), dominaron las incertidumbres en el gasto de salida de la cuenca. Por otro lado, S_i resultó ser el parámetro más sensible en todos los datos de salida de la cuenca, a excepción del tiempo de arribo de las descargas de gasto pico de escurrimiento y sedimento, seguido en sensibilidad por el coeficiente de rugosidad en planos (n_p) que afecta a todos, menos al volumen total de escurrimiento. Los parámetros G y K_s fueron los parámetros más sensibles en segundo y tercer lugar, respectivamente, sólo para el volumen total de escurrimiento, y ambos parámetros fueron menos sensibles comparado con n_p , para las otras variables de salida del modelo. Cabe destacar que S_i es altamente sensible tanto para tormentas de baja como de alta intensidad. Dada la alta sensibilidad a la humedad antecedente del suelo, es recomendable buscar métodos de medición para este parámetro (por ejemplo, por medio de percepción remota), de tal manera que se tenga una aplicación exitosa del modelo KINEROS2 (Hantush et al., 2005). En la Tabla 5.6 se resumen los parámetros más sensibles a las diferentes variables de salida del modelo.

Tabla 5.6 Sensibilidad de los parámetros de entrada de KINEROS2*

Parámetro	Tiempo pico		Gasto pico	Volumen total escurrimiento	Tormentas con intensidad	
	Gasto máximo	Descarga máxima sedimentos			Baja	Alta
S_i	<	<	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
n_p	✓	✓	✓	<	-	-
n_c	✓✓	✓✓	<	<	-	-
G	<	<	<	✓	-	-
K_s	<	<	<	✓	-	-

el más sensible	segundo más sensible	tercero más sensible	< menos sensible
-----------------	----------------------	----------------------	------------------

*Hantush, 2005

Hantush también exploró la relación entre la incertidumbre de los datos de salida del modelo y la intensidad de lluvia. Encontraron que la influencia de la incertidumbre de los parámetros cambia con la intensidad de la lluvia, y que la confianza de las predicciones del modelo disminuye con eventos de lluvia pequeños, es decir, que KINEROS2 trabaja con mayor confiabilidad bajo eventos de lluvia intensa que con eventos pequeños. Las características del suelo dominan el escurrimiento durante los eventos de lluvia pequeños, mientras que para eventos grandes, el escurrimiento y el transporte de sedimentos alcanzan un equilibrio relativamente rápido y son dominados por la intensidad de la tormenta.

Otras aplicaciones de KINEROS, además de cuencas semiáridas, han sido reportadas en la literatura sobre tierras de pastizal (Osborn & Simanton, 1990, Canfield et al, 2006)) y cuencas agrícolas (Kalin et al., 2003b). En este último estudio, Kalin menciona que la resolución geomorfológica óptima depende de la cantidad de interés. Entre las cantidades consideradas en el estudio, la resolución geomorfológica requerida es mucho mayor cuando el gasto pico es el principal interés y es menor cuando la carga total de sedimentos a la salida de la cuenca es la cantidad de interés.

Moral et al., 1995, realizó un estudio donde constata la importancia de la correcta determinación de las propiedades físicas de los suelos, como la conductividad hidráulica

saturada, para mostrar su efecto en el hidrograma de salida de la escorrentía superficial en una cuenca, al ser analizada dentro del marco de un modelo hidrológico estocástico y conceptual previamente propuesto por Freeze (1980), comparando los resultados con los obtenidos mediante el uso de un modelo determinístico (KINEROS), cuyos datos de entrada son los valores medios de las propiedades del suelo.

KINEROS ha sido aplicado a cuencas mayores de 100 km², tal es el caso de Aisha-Al Qurashi et al, 2008 donde se corrió el modelo en la cuenca árida de Ahin West de 734 km² en Oman y se encontraron predicciones pobres a las variables de salida para todos los eventos simulados y todas las calibraciones y estrategias de predicción. Mencionan que los resultados no fueron los esperados debido a que KINEROS tiene la importante restricción que la variabilidad espacial de la pendiente y las propiedades del suelo y superficie están montadas a los valores efectivos de los elementos: plano y canal. Por lo tanto, el modelo podría no ser considerado completamente distribuido cuando las áreas de los planos y las longitudes de los canales son grandes (como es el caso de la cuenca en estudio).

Otras aplicaciones de KINEROS han sido en cuencas urbanas (Bosley, 2008), comparación con otros métodos para el cambio climático (Nearing, 2005), descarga de sedimentos en una cuenca experimental (Lane et al.1997), en una ladera semiárida del suroeste de Estados Unidos (Gotti, 1996), en subcuencas con áreas de aproximadamente 200 km² en la cuenca del río Ruby (2,500 km²) al suroeste de Montana (Golder Associates Inc., 2004) y en la cuenca del río Malki Iskar en Bulgaria (Nikolova et al., 2009).

Arbuet, 2009 aplicó KINEROS a una cuenca en Argentina con un área de 5541 km² y con una subcuenca de 138 km². Calibró el modelo con tres eventos, con duraciones de lluvia entre 2 y 4 días, e hidrogramas de pico único. A pesar de haber corrido KINEROS en una cuenca tan grande y con lluvias con duración de varios días, Arbuet encontró una buena simulación de los hidrogramas de salida para cada evento analizado.

En cuanto a la realización de estudios en cuencas de climas tropicales, se encontró un trabajo desarrollado en Indonesia (Bisri et al, 2008) donde el modelo fue corrido en una cuenca de

15.39 km², en una zona con una precipitación anual de la cuenca de 1,700 mm. No se realizó ninguna calibración del modelo. Los autores comentan que el modelo fue capaz de predecir el escurrimiento en una cuenca pequeña. Marques da Silva et al., sin/fecha, realizó un estudio en la cuenca del río Paraíba al noreste de Brasil, con clima tropical-húmedo de 5.84 km², donde se dedicó a estimar las pérdidas de suelo y descarga de sedimentos en la cuenca. No realizó ninguna calibración, aunque comenta que es recomendable hacerla, y se considera que los resultados obtenidos son preliminares. Otros estudios han sido desarrollados en carreteras de montaña sin pavimentar en Chiang Mai, al norte de Tailandia (Ziegler et al., 2001, Ziegler et al., 1997).

En México se tienen documentadas aplicaciones de KINEROS (usando el programa AGWA), principalmente en la Sierra Gorda de Querétaro para el pago de servicios ecológicos en las cuencas El Chuveje (45.17 km²) y Arroyo Real (143.41 km²) (Abad, 2006) y para la valoración del potencial de servicios ambientales en vegetaciones contrastantes en la Reserva de la Biósfera (74 km²) (Mendoza, 2008). También se ha aplicado en la microcuenca Alcocer-Sosnabar, San Miguel de Allende, Gto. (Zambrano, 2010). En ninguno de estos casos se realizó la calibración del programa KINEROS previo al contexto de estudio que presentan. Por fuentes cercanas, se tiene conocimiento que también ha sido aplicado en Tabasco y la costa de Chiapas, con el inconveniente de que no han sido documentados.

5.4 Materiales utilizados

Se recopiló información hidrométrica, climática, edafológica, topográfica y de uso de suelo (por medio de imágenes de satélite) de la zona de interés, la cual fue proporcionada por el Organismo de Cuenca Frontera Sur de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Universidad Nacional Autónoma de Chiapas (UNACH-Facultad de Ingeniería), el Colegio de Posgraduados (COLPOS), la Universidad de Chapingo (Departamento de Irrigación), la Universidad Nacional Autónoma de México (Instituto de Ingeniería), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y páginas oficiales en Internet.

Información Topográfica. Se trabajó con un modelo digital de elevación a escala 1:30, 000 proporcionado por INEGI.

Información Edafológica. Se contó con el mapa de suelos de FAO a escala 1:5 000 000.

Información sobre uso de suelo. Se infirió a partir de imágenes de satélite LandSat TM+ y ETM+ de la zona donde se ubica la cuenca de Huixtla (Franja (Path) 21, Hilera (Row) 49 y 50).

Información hidrométrica. Se contó con el registro de gasto en las estaciones hidrométricas que se muestran en la Tabla 5.7. Dicha información fue proporcionada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, quien tuvo a bien extraer la información de gastos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), publicado por la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) de CONAGUA. Cabe aclarar que dentro del período de registro de todas las estaciones, existen datos faltantes en algunos años o meses.

Tabla 5.7 Información general de las estaciones hidrométricas con que se trabajó en la región de la Cuenca del río Huixtla

Núm. estación	Estación hidrométrica	Ubicación	Gasto Medio Diario	Período	Gasto máximo mensual	Período
23008	Huixtla	-92.467° 15.133°	✓	1934 -1996	✓	1980 - 1988
23006	Malpaso (CFE)	-92.192° 14.992°	✓	1954 -1999	–	--
23003	Cahuacán	-92.271° 14.717°	✓	1948 -1999	–	--
23019	Despoblado	-92.567° 15.217°	✓	1964 -1999	–	--
23020	Huehuetán	-92.417° 15.000°	✓	1964 -1999	–	--

Información climática. Se contó con el registro de las siguientes estaciones climatológicas (Tabla 5.8):

Tabla 5.8 Características generales de las estaciones climatológicas de la región de la cuenca de Huixtla

Núm. estación	Estación climatológica	Ubicación	Registro	Período
7077	Huixtla	-92.49° 15.14°	Lluvia media diaria	1954 - 2005
7164	Observatorio Climatológico de Tapachula	-92.27° 14.92°	Lluvia media horaria	1981 - 2004

Estos datos fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional, derivados de la base de datos CLICOM (Climate Computing Project).

5.5 Métodos

5.5.1 Procesamiento del modelo digital de elevación

Al aplicar el módulo que tiene KINEROS para delinear la cuenca, se obtuvo un área de 351.79 km² hasta un punto en el río cercano a la estación hidrométrica de Huixtla.

En cuanto a la asignación de CSA para la cuenca del Río Huixtla, después de probar con diferentes porcentajes de área de contribución, se fijó un valor del 1% por ser el de mayor conveniencia para el tamaño de área de la cuenca.

5.5.2 Procesamiento de la capa de vegetación y modificación a la tabla de consulta *nalc_lut*

El mapa temático de la Cubierta Vegetal se obtuvo por medio de la interpretación de las imágenes de satélite LandSat TM+ al aplicarles un clasificador genérico propuesto por Palacios, 2006, que permitió encontrar la extensión de coberturas vegetales usando 13 clases temáticas. Este método es un sistema de clasificación con supervisión que identifica objetos predefinidos, con base en la forma de la respuesta espectral, de manera rápida, eficiente y sin necesidad de muestras de campo. Justo la situación de muchos proyectos donde hay poco presupuesto, hay poca o nula información de campo y tal vez poco tiempo para procesar la información. Sin embargo, es importante mencionar que

este método no es recomendable para hacer análisis en el cambio de uso de suelo. El Clasificador está orientado a encontrar la forma más rápida y barata para identificar objetos genéricos en 13 clases temáticas, como vegetación, suelo desnudo, nubes y agua. Para mayor información sobre el Clasificador Genérico se puede consultar a Palacios, 2008.

Procesamiento de imágenes de satélite.

Se revisaron las imágenes LANDSAT pertenecientes a los satélites TM5, TM7 y ETM7, que se descargaron de la página del USGS (United States Geological Service): <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Para bajar las imágenes correspondientes a la cuenca de Huixtla, se buscaron aquellas con path 29 y row 49 y 50, aunque la mayoría de la cuenca (más del 90%) cayó en la hilera 49.

Se revisaron principalmente las imágenes TM4-5, en razón de que corresponden a la década de los ochenta y parte de los noventa, que son los años con los que se va a realizar la calibración del modelo, y porque el Clasificador Genérico está diseñado para trabajar a partir de imágenes TM4. Se encontró que las imágenes comenzaron en 1984, pero con mucha nubosidad. La primera con buena visibilidad fue la de 1986. En total se revisaron 43 imágenes de satélite, de las cuales se les aplicó el Clasificador Genérico a 22.

Las 13 clases temáticas corresponden a los temas y coberturas vegetales que se muestran en la Tabla 5.9.

El Clasificador Genérico define a cada cobertura vegetal dependiendo del porcentaje que ocupa en extensión de área como se observa en la Tabla 5.10.

Modificación de la tabla *nalc_lut*

Una vez que se aplicó el clasificador genérico para cada imagen de satélite, y se generó con ello un grid o mapa temático sobre la cubierta vegetal, se modificó la tabla de consulta *nalc_lut* (North American Land Cover Characterization (nalc), Look-up table (lut)), con que trabaja AGWA-KINEROS (Tabla 5.11). En dicha tabla se incluyeron los parámetros de porcentaje de cobertura vegetal (COVER), lámina de intercepción (INT),

en (mm), coeficiente de Manning (N) y porcentaje de la cuenca cubierta con materiales impermeables (IMPERV) para cada una de las 13 clases temáticas obtenidas con el Clasificador Genérico. Cabe aclarar que el programa AGWA utiliza esta tabla de consulta tanto para KINEROS como para SWAT, por lo que algunos parámetros no son utilizados en KINEROS, tal es el caso del número de curva, cuyos valores no se modificaron en dicha tabla.

Tabla 5.9. Clases temáticas utilizadas y coberturas asociadas

Código	Nombre	Observaciones
0	Sin datos	Las partes de la imagen que no tienen información
1	Sombra	Sombras proyectadas por nubes y relieve topográfico
2	Nube	Nubes densas
3	Bruma	Calina, neblina y nubes poco densas
4	Hielo y Glaciares	Nieve y glaciares
5	Agua	Cuerpos de agua
6	Artificial/arena oscura	Poblaciones y suelos arenosos oscuros
7	Suelo	Suelo desnudo y vegetación senescente o muerta
8	Vegetación Cobertura Baja	Vegetación con baja cobertura del suelo
9	Vegetación Cobertura Media	Vegetación con mediana cobertura del suelo
10	Vegetación Cobertura Alta	Vegetación con alta cobertura del suelo
11	Vegetación Densa	Vegetación oscura (bosques pantanos)
12	Otros	Valor que no corresponde a las anteriores

Para asignar los valores de los parámetros de la tabla anterior, se hizo una equivalencia entre usos/cubierta de suelo de la cuenca del Río Huixtla, con fecha de febrero de 1990, y las clases temáticas del Clasificador Genérico, como se muestra en la Tabla 5.12.

Tabla 5.10 Extensión que ocupa cada clase de cobertura vegetal

Código	Clase de cobertura	% de cobertura
0,1,2,3,4,5,6,y 12	-----	No definida
7	Suelo	0 -10 %
8	Vegetación Cobertura Baja	10-30 %
9	Vegetación Cobertura Media	30-60%
10	Vegetación Cobertura. Alta	60-100 %
11	Vegetación Densa	100 %

Tabla 5.11 Tabla de consulta *nalc_lut* con las clases temáticas del clasificador genérico

CLASS	NAME	A	B	C	D	COVER	INT	N	IMPERV
1	Sombra	0	0	0	0	0	0.00	0.000	0.00
2	Nube	0	0	0	0	0	0.00	0.000	0.00
3	Bruma	0	0	0	0	0	0.00	0.000	0.00
4	Hielo y Glaciares	100	100	100	100	0	0.00	0.000	0.00
5	Agua	100	100	100	100	0	0.00	0.000	0.00
6	Artificial o arena	73	83	88	90	10	0.10	0.013	0.20
7	Suelo	90	92	94	96	0	0.00	0.033	0.00
8	Vegetación cobertura baja	49	69	79	84	30	2.00	0.150	0.05
9	Vegetación cobertura media	66	77	85	89	60	1.15	0.100	0.00
10	Vegetación cobertura alta	48	48	57	63	100	2.80	0.600	0.00
11	Vegetación obscura	36	60	73	79	90	2.00	0.450	0.00

Tabla 5.12 Equivalencia entre las clases del Clasificador Genérico y usos de suelo

Usos de suelo en Febrero de 1990	Equivalencia en clases del clasificador genérico
Bosques	11 Vegetación densa
Selva	10 Vegetación cobertura alta
Matorrales, vegetación dispersa, agricultura – cultivos permanentes –	9 Vegetación cobertura media
Pastizal denso, rasante, Suelos en descanso con alguna cobertura	8 Vegetación cobertura baja

Finalmente, se seleccionaron las imágenes de apoyo para la corrida de los eventos de tormenta elegidos para la calibración y validación (Tabla 5.13). Se eligieron de acuerdo con una revisión cuidadosa de cada imagen y después de hacer una reclasificación para eliminar las clases temáticas 0 – sin datos- y 12 – otros- (como se observa en la Tabla 5.11), puesto que AGWA no acepta valores de cero.

Tabla 5.13 Imágenes de satélite que fueron utilizadas en la calibración, previa aplicación del clasificador genérico

Nombre Imagen	Fecha
LT50210491986111XXX03	860726
LT5020491993210AAA04	930729

5.5.3 Procesamiento de la capa de suelos

Se alimentó al modelo con el grid de suelos FAO, escala 1:5,000,000. Los suelos que conforman la cuenca se muestran en la Figura 5.11.

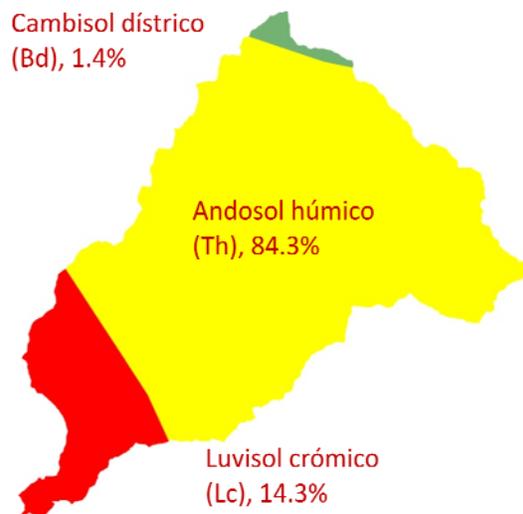


Figura 5.11 Suelos FAO que intersectan a la cuenca del Río Huixtla

5.5.4 Procesamiento del gasto base

Los valores de gasto base (Q_b) asignados para cada tormenta a calibrar fueron los siguientes:

Núm.	Fecha	hp,mm	Q _p (registrado), m ³ /s	Q _b , m ³ /s
1	14-Sep-81	115.9	266.45	36
2	24-Sep-82	69.2	332.866	11.8
3	27-Sep-87	44	84.2	13.2
4	02-Sep-88	135.1	417.778	26.5
5	12-Sep-90	42.2	172.14	10.5
6	27-Sep-96	19.1	51.076	19.9

5.5.5 Procesamiento de los valores iniciales del índice de saturación, S_i

Los valores iniciales de S_i se obtuvieron con base en el criterio de los cinco días antecedentes a la tormenta. A continuación se muestran los valores de cada tormenta elegida para su consecuente calibración.

Núm.	Fecha	hp,mm	Q _p (registrado), m ³ /s	S _i
1	14-Sep-81	115.9	266.5	0.9
2	24-Sep-82	69.2	332.9	0.95
3	27-Sep-87	44	84.2	0.55
4	02-Sep-88	135.1	417.8	0.99
5	12-Sep-90	42.2	172.1	0.95
6	27-Sep-96	19.1	51.1	0.92

5.5.6 Procesamiento de los datos de precipitación

5.5.6.1 Selección de tormentas a calibrar

Se considera que tanto la selección de tormentas como la generación de sus hietogramas requieren de especial atención debido a que ocupan una parte medular en la calibración y de KINEROS dentro del modelo AGWA. Se buscó elegir aquellas tormentas que fueran importantes en magnitud, pues son las que producen inundaciones.

Las tormentas susceptibles de ser seleccionadas se concretaron a la década de los años ochenta y noventa, porque son los años con que se cuenta con imágenes de satélite Landsat. Otra razón de peso por la cual se eligieron dichas décadas fue por la información climatológica e hidrométrica con que se cuenta. Se utilizaron los registros de lluvia media

diaria de la estación climatológica de Huixtla y de escurrimiento (gastos medios diarios) de la estación hidrométrica que lleva el mismo nombre.

Para la base de datos de los registros de lluvia y escurrimiento en las décadas de interés: se contó con una base de datos completa de lluvias para las décadas analizadas y se consideraron básicamente aquellas tormentas que se presentaron entre mayo y octubre por ser los meses con mayor intensidad de lluvia. En cuanto al registro de gastos medios diarios en Huixtla se adoleció de información para el año de 1995 y algunos meses de otros años del período registrado. Además, se utilizaron los registros hidrométricos de las cuencas vecinas a Huixtla: Cahuacán, Despoblado, Huehuetán y Malpaso.

Primera aproximación para seleccionar las tormentas

En una primera aproximación para seleccionar las tormentas, se graficaron la lluvia media diaria (hp) en mm y el gasto medio diario (Q), en m³/s, con respecto al tiempo, para los meses de mayo a octubre, por año. En la Figura A.1 del Anexo A se muestran las gráficas para cada año. Se puede observar en ellas que la década de los ochenta fue lluviosa y provocó mayor escurrimiento comparada con la década de los noventa. Una de las lluvias más importantes registrada en ambas décadas fue la de 1998 dado que generó escurrimientos que provocaron inundaciones y cuantiosos daños a la población de Huixtla y cuencas cercanas; sin embargo, dicha tormenta no puede ser utilizada para la calibración al no contar con datos de gasto para ese año. En general, la selección de tormentas para la década de los noventa fue difícil porque se observó que la respuesta de la cuenca fue de poco escurrimiento al ser afectada por lluvia. En la siguiente tabla se muestran los valores máximos medios diarios que se encontraron tanto para lluvias como para gastos en las dos décadas de análisis, la tormenta de septiembre de 1988, fue la que registró el gasto de mayor magnitud.

Década	Lluvia máx media diaria, mm	Fecha	Gasto máx. medio diario, m ³ /s	Fecha
80	236.9	6 jun. 1989	267.58	2 sep. 1988
90	144	8 sep. 1998	65.96	12 sep. 1990

Partiendo de las gráficas de la Figura A.1, se hizo un acercamiento para observar con mayor detalle el tramo donde se ubicaron los gastos pico sobresalientes y las lluvias importantes dentro de las décadas de estudio (Figura 5.12). Se observó que 10 días antes del gasto pico eran generalmente suficientes para considerar la lluvia antecedente, por lo que se decidió trabajar con una duración de 14 días (11 de ascenso al gasto pico y 3 de descenso). Esta duración sirvió en el proceso de selección del primer conjunto de tormentas susceptibles a ser elegidas. Además, dicha revisión visual fue de gran utilidad para discernir sobre la elección de alguna tormenta y observar el comportamiento de las lluvias y su escurrimiento.

Con la ayuda visual y con el objetivo de elegir el primer conjunto de tormentas susceptibles a ser las elegidas, se aplicaron tres criterios de selección, los cuales se mencionan más adelante.

Criterios de juicio para descartar o elegir tormentas susceptibles

Antes de pasar a dichos criterios de selección, se considera pertinente comentar sobre los criterios de juicio que se emplearon para descartar o elegir tormentas susceptibles, una vez creado el primer conjunto de tormentas. Se debe recordar que existe cierta incertidumbre en los datos registrados en las estaciones meteorológicas e hidrométricas del país, por los posibles errores intrínsecos en los registros, debido por ejemplo, a la hora de la toma del registro, errores de dedo al transcribir el registro a formato digital o al libro de registro, que generan dudas en el comportamiento del escurrimiento con respecto a la ocurrencia de lluvia en una tormenta determinada. Se observó en algunos casos por ejemplo, que los valores de escurrimiento parecían menores a lo que pudo haber generado la lluvia correspondiente, por esta razón se recurrió a ciertos análisis que permitieran avalar o descartar dichos valores. Se realizaron dos tipos de análisis para este propósito:

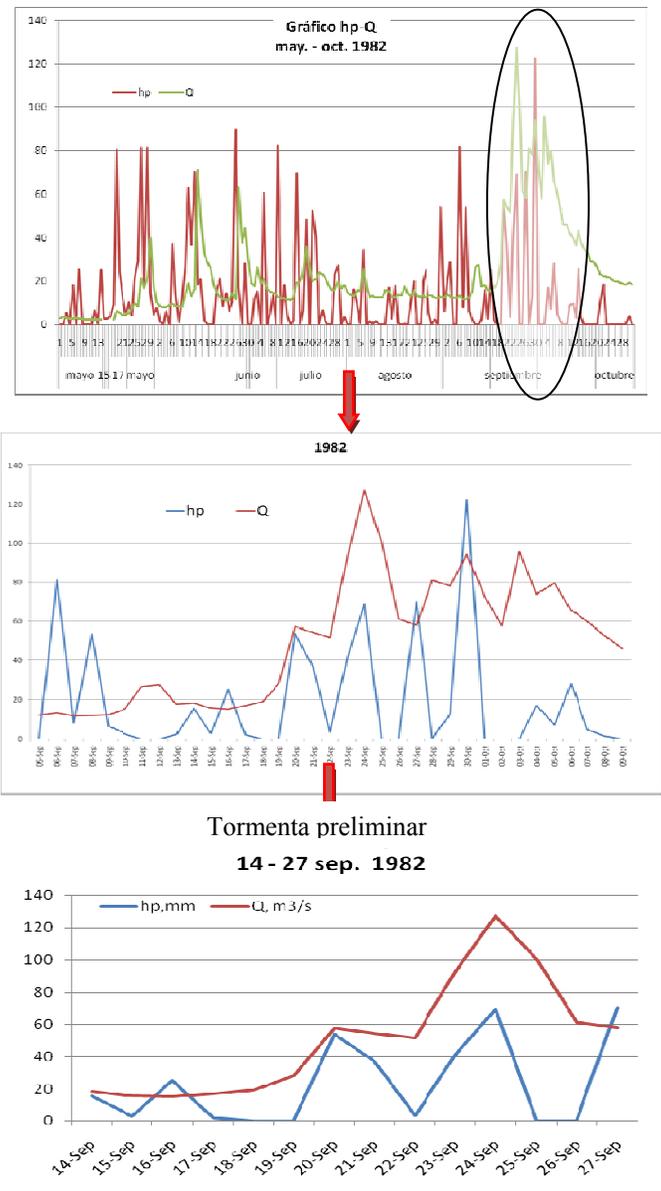
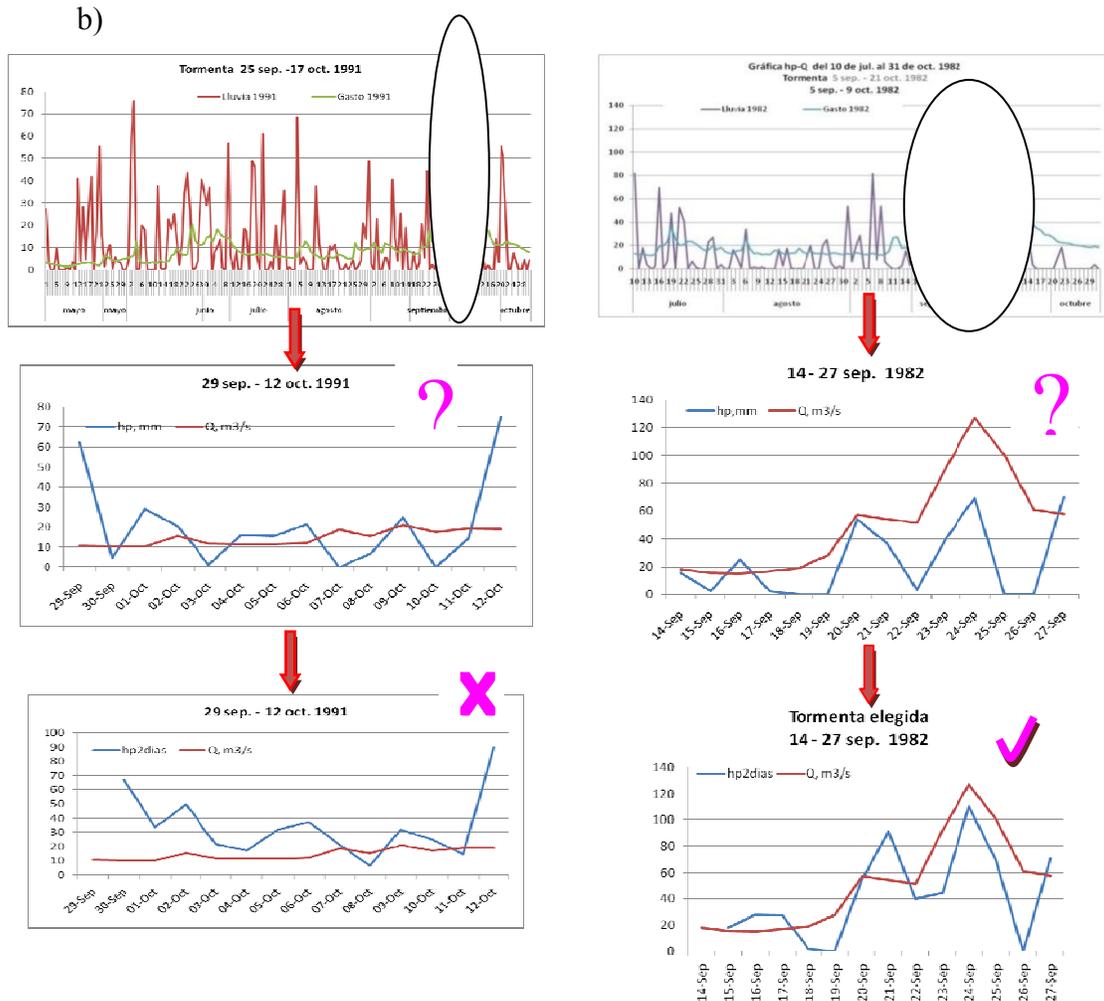


Figura 5.12 Proceso para elegir las posibles tormentas junto como su duración

- a) **Revisión del efecto de la lluvia de dos días consecutivos con respecto al gasto.**
 Este ejercicio sirvió para, además de disminuir los errores intrínsecos de los registros, mejorar la escala de visión al revisar las gráficas principalmente en las tormentas de la década de los noventa donde los escurrimientos fueron escasos. En la Figura 5.13 se proporciona un ejemplo de dos tormentas a las que se aplicó este criterio. En el caso de la gráfica de 1991 se trata de la tormenta con el gasto máximo en el año, al trazarla para 14 días se veía incierta en su forma y al aplicar

la suma de dos días consecutivos de lluvia (hp2días), se concluyó que había que descartarla. En el caso del año de 1982 en la misma figura, se tenía duda porque las lluvias de los días elegidos para la tormenta parecían no ser completamente influyentes en la ocurrencia del escurrimiento, al aplicar la lluvia de dos días se concluyó que sí influyeron.



Nota: El eje de las abscisas corresponde a la fecha de registro y el eje de las ordenadas a los valores de lluvia y gasto

Figura 5.13 Ejemplo de tormentas a las que se aplicó el criterio de la lluvia acumulada de dos días consecutivos

En cuencas como las de la Costa de Chiapas, las tormentas se caracterizan por durar varios días, humedeciendo el suelo y provocando escurrimientos e inundaciones, por lo que la lluvia del día anterior al analizado, puede influir en el escurrimiento. En la siguiente tabla se anota

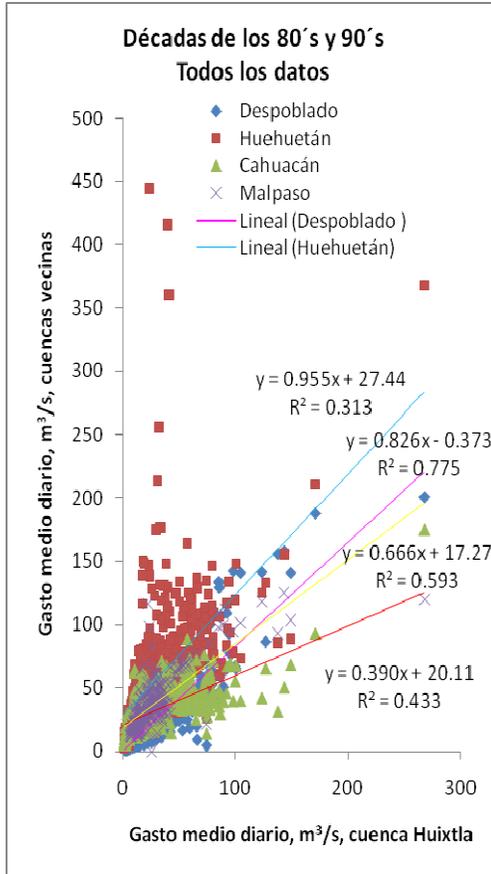
la lluvia media diaria, hp_{med24h} asociada al gasto máximo medio diario, $Q_{máxmed24h}$, y su correspondiente lluvia de dos días consecutivos, $hp_{2días}$, para ambas décadas. Se deduce en dicha tabla que llovieron casi la misma cantidad de agua en los dos días de ambas tormentas (la de 1988 y 1990), lo que indica que la lluvia de los dos días sí influyó en el escurrimiento.

Década	hp_{med24h} , mm, asociada a $Q_{máxmed24h}$	$Q_{máxmed24h}$, m ³ /s	Fecha	$hp_{2días}$, mm, asociada a $Q_{máxmed24h}$	Fecha
80	135.1	267.58	2 sep. 1988	261.2	1, 2 sep. 1988
90	42.2	65.96	12 sep.1990	76.5	11, 12 sep. 1990

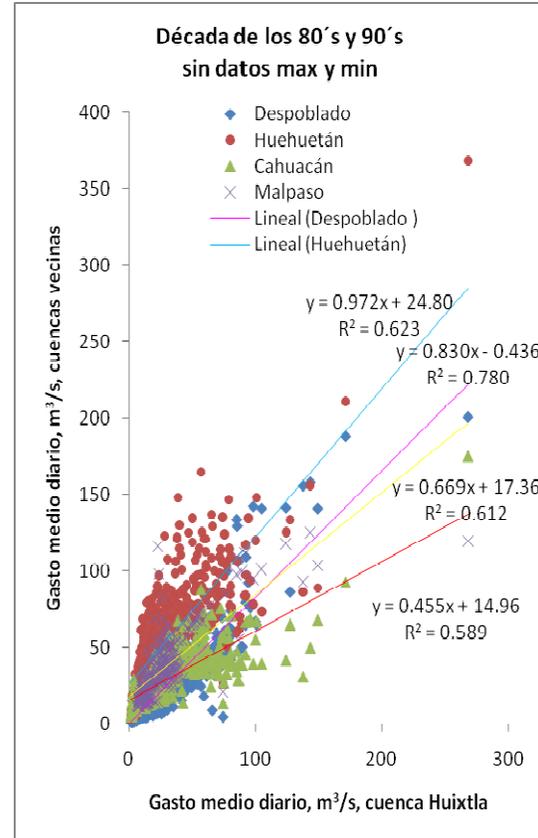
- c) **Análisis de escurrimiento entre cuencas vecinas.** Se correlacionaron los gastos medios diarios registrados en las estaciones hidrométricas de 4 cuencas vecinas (Malpaso, Despoblado, Huehuetán y Cahucán) con los gastos de la estación hidrométrica Huixtla con la finalidad de establecer la mejor correlación con respecto a la de Huixtla, y así tener un punto de comparación en caso que se tuviera duda en la lectura de los gastos de cada tormenta.

Se creó un grupo de 855 valores de gastos medios diarios para cada una de las cinco cuencas con lo que se buscó la mejor correlación entre ellos. El conjunto de datos correspondió a los valores del mes en que se presentó cada tormenta con gasto medio máximo por año en Huixtla y sus correspondientes valores en las cuencas vecinas, para las dos décadas analizadas, junto con el mes que antecedente. En todos los casos se tomaron dos meses de datos. En la Figura 5.14 se muestra el resultado de la correlación entre Huixtla y cada cuenca, donde el eje de las abscisas corresponde a los valores de gasto medio diario en la cuenca de Huixtla y el eje de las ordenadas corresponde a los valores de gasto correspondientes a las 4 cuencas vecinas a Huixtla. La Figura 5.14a se refiere al análisis considerando el total de 855 datos de cada cuenca y la Figura 5.14b al análisis para mejorar la correlación, por medio de eliminar en los casos necesarios, los datos de menor y mayor magnitud,

porque se disparaban en la muestra. Los resultados de la correlación se muestran en la Tabla 5.14.



5.14.a Correlación utilizando toda la muestra de datos



5.14.b Correlación quitando los máximos y mínimos

Figura 5.14 Correlación entre los gastos medios diarios de la estación Huixtla y los correspondientes a las cuencas vecinas

Como se puede observar en la tabla y figura anteriores, la correlación más baja utilizando todos los datos (Figura 5.14.a), correspondió a Huehuetán y la mejor correspondió a Despoblado. Al eliminar los máximos y mínimos (Figura 5.14.b), la correlación con Cahuacán resultó ser la correlación más baja y la mejor fue con Despoblado. Por lo tanto, se concluye que la cuenca de Despoblado es la que tiene un comportamiento hidrológico similar a la de Huixtla, por lo que se utilizaron sus datos para comparar y revisar los posibles errores intrínsecos en el registro de Huixtla.

Tabla 5. 14. Funciones de correlación entre Huixtla y cuencas vecinas

Cuenca	Correlación	Ecuación, coef. de determinación (R^2) y coef. de correlación (R)	
		Todos los datos	Sin máximos y mínimos
Despoblado	Lineal	$y = 0.826x - 0.373$	$y = 0.830x - 0.436$
		$R^2 = 0.775$ $R = 0.880$	$R^2 = 0.780$ $R = 0.883$
Huehuetán	Lineal	$y = 0.955x + 27.44$	$y = 0.972x + 24.80$
		$R^2 = 0.313$ $R = 0.559$	$R^2 = 0.623$ $R = 0.789$
Cahuacán	Lineal	$Y = 0.390x + 20.11$	$y = 0.455x + 14.96$
		$R^2 = 0.433$ $R = 0.658$	$R^2 = 0.589$ $R = 0.767$
Malpaso	Lineal	$y = 0.666x + 17.27$	$y = 0.669x + 17.36$
		$R^2 = 0.593$ $R = 0.770$	$R^2 = 0.612$ $R = 0.782$

Nota: La variable independiente corresponde al gasto de Huixtla y la variable dependiente corresponde a los gastos de cada cuenca vecina

Un ejemplo de ello es la tormenta del 25 de mayo al 7 de junio de 1981. Había duda porque la lluvia precipitada del día 4 de junio fue de 135.1 mm y el gasto registrado para ese día fue de 7.04 m³/s (un gasto casi nulo). Al comparar con el gasto registrado en Despoblado, se encontró que fue muy parecido (5.76 m³/s), lo cual indica que en realidad se registró un gasto bajo en la estación hidrométrica de Huixtla. En la Figura 5.15 se muestran los datos de lluvia y gasto de la tormenta en cuestión, junto con el gasto registrado en Despoblado. Se observa que los gastos en Huixtla y Despoblado son muy parecidos a lo largo del período de tiempo.

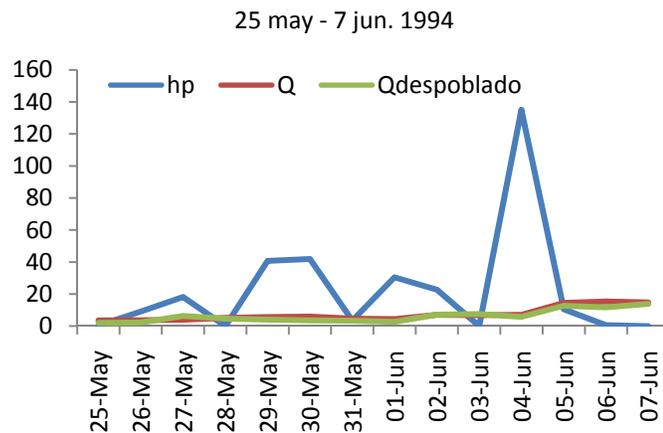


Figura 5.15 Ejemplo de comparación de gastos entre Huixtla y Despoblado

Habiendo fijado los criterios de juicio, se presentan a continuación los criterios de selección de las tormentas susceptibles a ser elegidas para la calibración y validación del programa AGWA-interfase KINEROS.

Criterios de selección. Como una primera aproximación para elegir las tormentas susceptibles, se aplicaron tres criterios de selección. Se debe recordar que la duración de las tormentas elegidas en esta etapa de selección, debe ser de 14 días, donde 11 días se refieren a la parte ascendente antes de la ocurrencia del gasto pico o lluvia (según sea el criterio que se esté trabajando) y 3 después de éste. Los criterios son

- i. Tormentas que generaron el gasto medio diario máximo por año
- ii. Tormentas que generaron gastos máximos cercanos al máximo por año
- iii. Tormentas que presentaron lluvias mayores a 100 mm

Aplicando los tres criterios se encontraron 64 tormentas como primer conjunto de selección. En la Tabla 5.15 se despliegan las fechas de los valores de gasto (criterios i. y ii.) y de lluvia (criterio iii.), con que se construyó cada tormenta de 14 días. Dichas

tormentas se muestran gráficamente en el Anexo A (Figura A.2, Figura A.3, y Figura A.4).

Tabla 5.15 Primera selección de tormentas y reducción de éstas en dos procesos de revisión

	<i>Primera selección</i>			<i>Primera revisión</i>	<i>Segunda revisión</i>
	<i>Criterio a. Gasto medio diario máximo, m³/s</i>	<i>Criterio b. Gastos máximos cercanos al máximo, m³/s</i>	<i>Criterio c. Lluvias mayores a 100 mm</i>	<i>Tormenta con 14 días de duración</i>	
	<i>Fecha de registro gasto o lluvia, con que se construyó la tormenta de 14 días</i>				
1	25-Sep 1980	13-Sep 1980	28-May 1980	3 - 16 Sep 1980	3-16 Sep 1980
2	28-Sep 1981	19-Sep1980	01-Oct 1980	15 - 28 Sep 1980	15 - 28 Sep 1980
3	24-Sep 1982	09-Ago 1980	19-Oct 1980	30 Jul - 12 Ago 1980	30 Jul - 12 Ago 1980
4	09-Sep 1983	27-Jun 1981	14-Sep 1981	9 - 22 Oct 1980	
5	04-Sep 1984	03-Jul 1981	23-Oct 1981	18 Sep - 1 Oct 1981	
6	24-Ago 1985	28-Ago 1981	02-Sep 1983	23 Jun - 6 Jul 1981	23 Jun - 6 Jul 1981
7	31-May 1986	13-Oct 1981	06-Sep 1983	17 - 30 Ago 1981	
8	21-Jul 1987	14-Jun 1982	12-Sep 1983	4 - 17 Sep 1981	4 - 17 Sep 1981
9	02-Sep 1988	03-Oct 1982	30-May 1986	4 - 17 Jun 1982	4 - 17 Jun 1982
10	20-Sep 1989	27-Jun 1986	09-Jul 1986	14 - 27 Sep 1982	14 - 27 Sep 1982
11	12-Sep 1990	27-Sep 1987	20-Jul 1988	23 Sep - 6 Oct 1982	
12	09-Oct 1991	25-Jun 1991	31-Ago 1988	30 Ago - 12 Sep 1983	30 Ago - 12 Sep 1983
13	30-Sep 1992	15-Jul 1992	01-Sep 1988	23 Ago - 5 Sep 1983	23 Ago - 5 Sep 1983
14	28-Sep 1993	01-Jul 1993	02-Sep 1988	21 May - 3 Jun 1986	21 May - 3 Jun 1986
15	13-Oct 1994	20-Ago 1993	02-Jun 1990	17 - 30 Jun 1986	17 - 30 Jun 1986
16	04-Oct 1995	29-Sep 1994	12-Jun 1990	29 Jun - 12 Jun 1986	29 Jun - 12 Jul 1986
17	27-Sep 1996	10-Jun 1994	18-Ago 1992	11 - 24 Jul 1987	11 -24 Jul 1987
18		18-Oct 1995	10-Sep 1992	17-30 Sep 1987	17 - 30 Sep 1987
19		22-Ago 1996	11-Sep 1992	23 Ago. - 5 Sep 1988	23 Ago - 5 Sep 1988
20		29-Jun 1996	12-Sep 1992	2 - 15 Sep 1990	2 - 15 Sep 1990
21			29-May 1993	15 - 28 Jun 1991	15 - 28 Jun 1991
22			12-Oct 1993	5 - 18 Jul 1992	
23			04-Jun 1994	21 Jun.- 4 Jul 1993	21 Jun - 4 Jul 1993
24			11-Oct 1994	10 - 23 Ago 1993	10 - 23 Ago 1993
25			05-May 1996	3 -16 Oct 1994	3 - 16 Oct 1994
26			09-Ago 1996	19 - 2 Oct 1994	19 Sep - 2 Oct 1994
27			19-Ago 1996	24 Sep. -7 Oct 1995	
28				19 Jun. - 2 Jul 1996	19 Jun - 2 Jul 1996
29				12 - 25 Ago 1996	12 - 25 Ago 1996
30				17 - 30 Sep 1996	17 - 30 Sep 1996

Posteriormente aparece en la Tabla 5.15 una columna con la reducción del número de tormentas de 14 días, producto de una primera y segunda revisión, aplicando los criterios de juicio mencionados anteriormente. En la segunda revisión se redujeron a 24 de las 64 tormentas iniciales (Figura A.5).

Dado que los datos de entrada de lluvia del modelo KINEROS se alimentan por medio de un hietograma con duración de 24 horas o poco más, se decidió reducir el número de días de duración de las 24 tormentas de la segunda revisión. Se buscó en cada tormenta el día en que se presentó el gasto más importante y a partir de ese día se consideraron hasta cinco días antes de la ocurrencia del gasto, dependiendo de la influencia de la lluvia en la generación del escurrimiento. Cada día considerado se le tomó como una tormenta con duración de 24 horas. En la Tabla 5.16 parecen los datos de las tormentas reducidas en duración de la década de los ochenta (columna D), como son lluvia para 1 día (columna E), lluvia acumulada para dos días consecutivos (columna F) y gasto (G). En la Tabla 5.17 aparecen los mismos datos correspondientes a las tormentas reducidas de la década de los noventa.

Selección de las tormentas definitivas.

Las tormentas definitivas se obtuvieron a partir de los datos de las Tablas 5.16 y 5.17, aplicando el siguiente procedimiento:

- **Correlación de la lluvia de 1 y 2 días con el gasto.** Se correlacionaron por separado los pares de lluvia de 1 día ($hp_{1\text{día}}$) – gasto (Q), (columnas E y G, respectivamente), y la lluvia acumulada para 2 días ($hp_{2\text{días}}$) – gasto (Q), (columnas F y G), respectivamente. Se condicionó que en ambos casos de correlación, el análisis fuera con lluvias mayores a los 40 mm con la finalidad de eliminar valores pequeños que no influyen en una tormenta, y porque varias de las tormentas de la década de los noventa tuvieron registros bajos de lluvia, de tal manera que se decidió que 40 mm era un buen umbral para comenzar a hacer el análisis.

Tabla 5.16 Tormentas de 1 día de duración para la década de los ochenta, a partir de tormentas de 14 días

A	B	C	D	E	F	G
Año	Núm. Tormenta	Tormenta 14 días	Tormenta 1 día	hp _{1días} ,mm	hp _{2días} ,mm	Q, m ³ /s
1980	1	15-28 sep	22-Sep	75		53.45
			23-Sep	2.3	77.3	72.38
			24-Sep	48.6	50.9	70.13
			25-Sep	25.8	74.4	99.87
			26-Sep	26.3	52.1	80.64
	2	3-16 sep.	12-Sep	7.8		31.22
			13-Sep	61.6	69.4	65.24
	3	30 jul.- 12 ago.	07-Ago	45		24.73
			08-Ago	66.2	111.2	28.64
09-Ago			1.8	68	45.91	
1981	4	23 jun,-6 jul.	26-Jun	28		60.81
			27-Jun	35.3	63.3	85.93
			28-Jun	31.2	66.5	52.90
			01-Jul	85.2		33.88
			02-Jul	8.6	93.8	32.76
			03-Jul	4.5	13.1	81.95
	5	4-17 sep.	13-Sep	84.4		68.41
			14-Sep	115.9	200.3	79.87
	1982	6	14 - 27 sep.	23-Sep	41	
24-Sep				69.2	110.2	127.33
7		4 - 17 jun.	13-Jun	70.2		16.38
	14-Jun		18.4	88.6	71.18	
1983	8	30 ago. - 12 sep.	01-Sep	88.4		28.58
			02-Sep	151.2	239.6	50.35
			06-Sep	111.6		39.18
			07-Sep	14	125.6	55.87
			08-Sep	3.4	17.4	60.60
			09-Sep	20	23.4	69.79
			11-Sep	2.4		40.22
			12-Sep	110.9	113.3	38.52
	9	23 ago. - 5 sep.	01-Sep	88.4		28.58
			02-Sep	151.2	239.6	50.35
			03-Sep	0.6	151.8	47.41
1986	10	21 may. - 3 jun.	29-May	64.2		15.59
			30-May	120.6	184.8	59.59
			31-May	2.5	123.1	92.42
	11	29 jun. -12 jul.	09-Jul	141.1		28.98
			10-Jul	0	141.1	42.78
	12	17 - 30 jun.	26-Jun	23.5		12.53
27-Jun			75.6	99.1	66.36	
1987	13	11 -24 jul.	20-Jul	0		10.73
			21-Jul	178.8	178.8	74.91
	14	17 - 30 sep.	26-Sep	45.7		27.38
27-Sep			44	89.7	43.14	
1988	15	23 ago. - 5 sep.	31-Ago	130.7		86.80
			01-Sep	126.1	256.8	149.20
			02-Sep	135.1	261.2	267.58
			03-Sep	21.1	156.2	171.33

Tabla 5.17 Tormentas de 1 día de duración para la década de los noventa, a partir de tormentas de 14 días

A	B	C	D	E	F	G
Año	Núm. Tormenta	Tormenta 14 días	Tormenta 1 día	hp 1 día, mm	hp _{2días} ,mm	Q, m ³ /s
1990	16	2- 15 sep.	11-Sep	34.3		53.12
			12-Sep	42.2	76.5	65.96
1991	17	15 - 28 jun.	23-Jun	43.5		7.22
			24-Jun	26.7	70.2	15.63
			25-Jun	0	26.7	20.63
1993	18	21 jun. - 4 jul.	30-Jun	57.8		22.59
			01-Jul	7.2	65	39.28
	19	10 - 23 ago.	19-Ago	87.4		28.11
			20-Ago	49.7	137.1	38.29
1994	20	19 sep. - 2 oct.	27-Sep	64.7		16.39
			28-Sep	22.5	87.2	21.27
			29-Sep	0.8	23.3	38.78
	21	3 -16 oct.	11-Oct	108.1		24.18
12-Oct			61.8	169.9	40.16	
13-Oct			31.3	93.1	41.27	
14-Oct			29.2	60.5	34.73	
1996	22	19 jun. -2 jul.	26-Jun	32.4		33.62
			27-Jun	40	72.4	31.30
			28-Jun	59	99	46.67
			29-Jun	10.3	69.3	47.48
			30-Jun	0	10.3	45.577
	23	17 - 30 sep.	25-Sep	66.8		36.80
			26-Sep	76.1	142.9	45.60
			27-Sep	19.1	95.2	47.88
	24	12 - 25 ago.	19-Ago	102.3		20.05
			20-Ago	69.4	171.7	29.01
21-Ago			37.1	106.5	34.47	
22-Ago			21.5	58.6	45.88	

El programa que se utilizó para correlacionar los datos fue *CurveExpert*, un software gratuito por internet que permite aplicar varias funciones de correlación. Al graficar los pares de lluvia y gasto se encontró que algunos valores se disparaban e impedían conseguir una correlación aceptable, por lo que se eliminaron dichos pares de la muestra, siendo estos los menos. En la Tabla 5.18 se describen las características de la correlación que mejor ajustó a cada grupo de datos lluvia-gasto. Así mismo, en la

Figura 5.16 y Figura 5.17 se muestran las respectivas gráficas de correlación para $(hp_{1\text{día}} - Q)$, y $(hp_{2\text{días}} - Q)$.

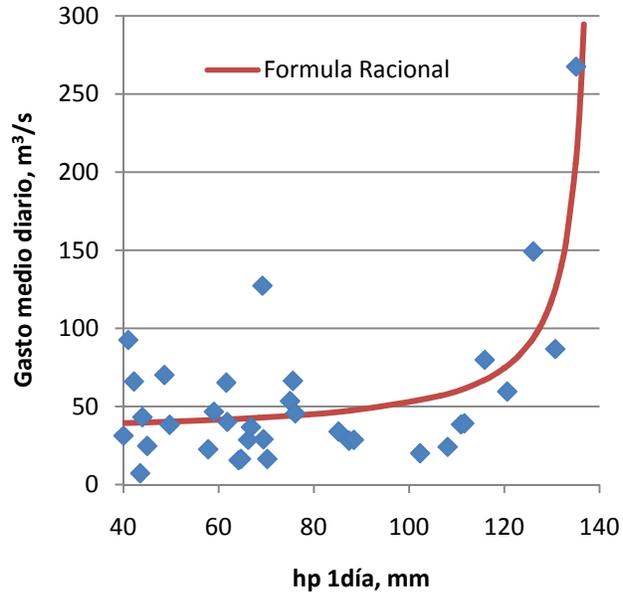


Figura 5.16 Correlación entre la lluvia media diaria de 1 día y el gasto medio diario del mismo día

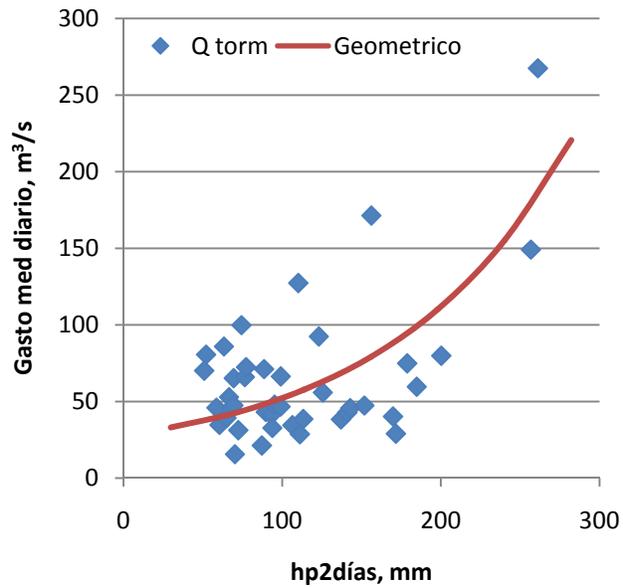


Figura 5.17 Correlación entre la lluvia acumulada de 2 días y el gasto medio diario del segundo día

Tabla 5.18 Características principales de las correlaciones que mejor se ajustaron a los datos de lluvia-gasto

Datos	Correlación	Fórmula	Coefficientes	Error Estándar, S	Coef. Correlación, r
hp _{1día} - Q	Racional	$y = \frac{a+bx}{1+cx+dx^2}$	a = 3.67646462202E+001 b = -2.17740035872E-001 c = -7.16750203120E-003 d = 1.90328959639E-007	31.35	0.7926
hp _{2días} - Q	Geométrica	$y = ax^{bx}$	a = 2.90533668884E+001 b = 1.27311384155E-003	35.38	0.6485

Nota: la variable independiente corresponde a la lluvia y la variable dependiente corresponde al gasto

- Cálculo del gasto estimado, utilizando la función de correlación de cada grupo de datos.** Se obtuvo el gasto calculado, Q_{estimado}, utilizando la fórmula racional y geométrica de correlación, al utilizar respectivamente los valores de lluvia de 1 día y de 2 días. Los valores del gasto estimado se muestran en la columna C de las Tabla 5.19, correspondiente a hp_{1día}, y la Tabla 5.20, correspondiente a hp_{2días}, con la observación de que solamente se presentan aquellos valores que se apegaron a la línea de tendencia de las respectivas correlaciones, teniendo un rango de error del 30%.

Tabla 5.19 Tormentas con el criterio hp_{1día} > 40 mm y 0.7 < Coeficiente < 1.3

	B	C	D	E	F
hp _{1día} , mm	Q, m ³ /s	Q _{estimado} , m ³ /s	Coeficiente	Fecha	Año
75	53.45	44.0859	1.212	22-Sep-80	80
85.2	33.879	46.6156	0.727	01-Jul-81	81
115.9	79.868	67.0878	1.190	14-Sep-81	81
120.6	59.5853	75.9225	0.785	30-May-86	86
44	43.1444	39.6849	1.087	27-Sep-87	87
130.7	86.8028	124.98	0.695	31-Ago-88	88
126.1	149.2	93.8227	1.590	01-Sep-88	88
135.1	267.581	209.08	1.280	02-Sep-88	88
49.7	38.2942	40.2688	0.951	20-Ago-93	93
61.8	40.1634	41.788	0.961	12-Oct-94	94
40	31.2982	39.3146	0.796	27-Jun-96	96
59	46.6702	41.3964	1.127	28-Jun-96	96
66.8	36.796	42.5614	0.865	25-Sep-96	96
76.1	45.5965	44.32	1.029	26-Sep-96	96

Tabla 5.20 Tormentas con el criterio $hp_{2\text{días}} > 40 \text{ mm}$ y $0.7 < \text{Coeficiente} < 1.3$

$hp_{2\text{días}}$, mm	Q, m ³ /s	Qestimado, m ³ /s	coeficiente	Fecha	Año
68	45.909	41.6639	1.102	09-Ago	80
66.5	52.903	41.4496	1.276	28-Jun	81
200.3	79.868	112.237	0.712	14-Sep	81
125.6	55.87	62.9262	0.888	07-Sep	83
99.1	66.36287	51.8839	1.279	27-Jun	86
89.7	43.14436	48.5514	0.889	27-Sep	87
178.8	74.90942	94.6039	0.792	21-Jul	87
256.8	149.19961	178.229	0.837	01-Sep	88
261.2	267.58123	184.897	1.447	02-Sep	88
65	39.28183	41.0411	0.957	01-Jul	93
60.5	34.73173	39.8505	0.872	14-Oct	94
93.1	41.27217	49.7244	0.830	13-Oct	94
58.6	45.87742	39.3631	1.165	22-Ago	96
69.3	47.48165	42.2278	1.124	29-Jun	96
72.4	31.29818	43.1137	0.726	27-Jun	96
95.2	47.88163	50.4671	0.949	27-Sep	96
99	46.67023	51.8469	0.900	28-Jun	96

Tanto en la Tabla 5.19 como en la Tabla 5.20 aparece una columna (D) que lleva el nombre de *Coeficiente*, donde se calculó el cociente Q/Q_{estimado} , para conocer el rango de error del gasto calculado con respecto al registrado. Los valores que aparecen en dicha columna muestran únicamente los que cayeron dentro del rango del 30%, es decir, entre 0.7 y 1.3.

Sólo se hizo una excepción con las tormentas de 1988 donde se agregó la tormenta del primero de septiembre con un coeficiente de 1.590 en las tormentas de hp de 1 día y la tormenta del 2 de septiembre con un coeficiente de 1.447 en las tormentas con hp de 2 días, esto debido a que el gasto Q de esos días es de los máximos registrados en el período de años analizado por lo que se consideró importante incluirlas. Sin embargo, dependiendo de su comportamiento en los subsecuentes análisis, se verá si se siguen incluyendo o no.

- **Comparación de los gastos calculados para obtener las tormentas definitivas.** Se compararon los gastos calculados, Qestimado, de las Tablas 5.19 y 5.20, por medio de las fechas en que se registraron los gastos Q. En la Tabla 5.21 se muestra dicha comparación y se observa que 6 fechas coincidieron para ambos casos de lluvia (celdas sombreadas en color morado claro). Estas representan las tormentas probables para realizar la calibración y se resumen en la Tabla 5.22.

Dichas tormentas sirven para generar los hietogramas de entrada con que se alimenta el modelo AGWA-interfase KINEROS, sólo resta buscar si se tiene el gasto pico máximo mensual para cada una de ellas (obtenido a partir de la base de datos BANDAS), y de esta manera comprobar que se trata de eventos máximos. Se encontró que 4 de las 6 tormentas son máximas (última columna de la Tabla 5.22), por lo que tres tormentas se descartaron (tuvo que descartarse la del 28 de junio de 1996 aún cuando fue una tormenta máxima porque no se contó con su registro de gasto pico), pues sería imposible su calibración al no contar con el gasto pico registrado que se compara con el estimado por KINEROS. Las tormentas definitivas para la calibración se muestran en la Tabla 5.23.

A continuación se resumen los pasos que se llevaron a cabo para obtener las tormentas definitivas de 1 día, necesarias para la calibración del modelo AGWA-KINEROS:

- i. Graficar por año, entre los meses de mayo y octubre, los valores de lluvia (mm) y gasto (m^3/s), con respecto al tiempo (días). Ubicar visualmente la ocurrencia de gastos pico sobresalientes y lluvias importantes. A partir de la revisión de esos tramos de tormenta en el año, definir la duración con que se trabajarán las tormentas iniciales
- ii. Aplicar los tres criterios que se mencionan para elegir el primer conjunto de tormentas susceptibles a ser elegidas
- iii. Revisar las tormentas del primer conjunto, aplicando los criterios de juicio para descartar aquellas menos importantes

Tabla 5.21. Tabla comparativa entre tormentas de 1 día y 2 días con coeficiente mayor a 0.7 y menor a 1.3

hp,mm	Q, m3/s	Qcalculado, m3/s	Coef 1día	Año	Fecha	hp2días,mm	Q, m3/s	Qcalculado, m3/s	Coef 2dias	Año
					09-Ago-80	68	45.909	41.6639	1.102	80
75	53.45	44.0859	1.212	80	22-Sep-80					
					28-Jun-81	66.5	52.903	41.4496	1.276	81
85.2	33.879	46.6156	0.727	81	01-Jul-81					
115.9	79.868	67.0878	1.190	81	14-Sep-81	200.3	79.868	112.237	0.712	81
					07-Sep-83	125.6	55.87	62.9262	0.888	83
120.6	59.5853	75.9225	0.785	86	30-May-86					
					27-Jun-86	99.1	66.36287	51.8839	1.279	86
44	43.1444	39.6849	1.087	87	27-Sep-87	89.7	43.14436	48.5514	0.889	87
130.7	86.8028	124.98	0.695	88	31-Ago-88					
126.1	149.2	93.8227	1.590	88	01-Sep-88	256.8	149.19961	178.229	0.837	88
135.1	267.581	209.08	1.280	88	02-Sep-88	261.2	267.58123	184.897	1.447	88
					01-Jul-93	65	39.28183	41.0411	0.957	93
49.7	38.2942	40.2688	0.951	93	20-Ago-93					
61.8	40.1634	41.788	0.961	94	12-Oct-94					
					13-Oct-94	93.1	41.27217	49.7244	0.830	94
					14-Oct-94	60.5	34.73173	39.8505	0.872	94
40	31.2982	39.3146	0.796	96	27-Jun-96	72.4	31.29818	43.1137	0.726	96
59	46.6702	41.3964	1.127	96	28-Jun-96	99	46.67023	51.8469	0.900	96
					29-Jun-96	69.3	47.48165	42.2278	1.124	96
					22-Ago-96	58.6	45.87742	39.3631	1.165	96
66.8	36.796	42.5614	0.865	96	25-Sep-96					
76.1	45.5965	44.32	1.029	96	26-Sep-96					
					27-Sep-96	95.2	47.88163	50.4671	0.949	96

Tabla 5.22. Tormentas probables de 1 día para calibrar el modelo KINEROS en la cuenca de Huixtla

Núm.	Fecha	hp,mm	Q, m ³ /s	Q _p registrado,
1	14-Sep-81	115.9	79.9	266.5
2	27-Sep-87	44	43.1	84.2
3	01-Sep-88	126.1	149.2	-
4	02-Sep-88	135.1	267.6	417.8
5	27-Jun-96	40	31.3	-
6	28-Jun-96	59	46.7	máximo sin registro

Tabla 5.23 Tormentas definitivas para calibrar el modelo KINEROS en la cuenca de Huixtla

Núm.	Fecha	hp,mm	Q _p (registrado), m ³ /s
1	14-Sep-81	115.9	266.5
2	24-Sep-82	69.2	332.9
3	27-Sep-87	44	84.2
4	02-Sep-88	135.1	417.8
5	12-Sep-90	42.2	172.1
6	09-Oct-91	24.9	23.1
7	30-Jun-93	57.8	31.3
8	27-Sep-96	19.1	51.1

- iv. Reducir la duración de las tormentas producto de la última revisión y considerar cada día dentro de la tormenta de varios días, como una tormenta de 24 horas
- v. Aplicar el criterio para elegir las tormentas definitivas a partir de aquellas que se les redujo su duración (punto anterior), revisar si corresponden a las que generaron los valores de gasto pico máximo mensual
- vi. Con las tormentas definitivas elegidas, obtener sus respectivos hietogramas y curvas masa como se indica en el próximo capítulo

5.5.6.2 Métodos para construir hietogramas horarios y su respectiva curva masa, a partir de lluvia registrada en 24 hr

Cuando se requiere calibrar un método hidrológico cualquiera, es necesario contar entre otras cosas con información de precipitación de las fechas que se eligieron para ser calibrado el modelo. Como se comentó anteriormente, para el caso de KINEROS, la precipitación debe ser dada para eventos de tormenta menores a 24 horas. Para ser más precisos, KINEROS requiere la entrada de la variable-lluvia en forma de hietogramas acumulados (curva masa) en pares de lluvia acumulada (mm)-tiempo (min).

Como es bien sabido, México cuenta generalmente con registros de lluvia de 24 horas y que fue el caso de Huixtla, con lo que se dificultó la alimentación del programa, de ahí que surgiera la necesidad de investigar métodos que permitieran convertir la lluvia de 24 horas a hietogramas menores a 24 horas, junto con su respectiva curva masa, deduciendo su duración y forma.

Existen en la literatura varias metodologías para generar lluvias horarias o intensidades a partir de lluvias diarias que por lo general se centran en obtener curvas intensidad-duración-frecuencia pues están enfocadas a obtener lluvias de diseño; sin embargo, la naturaleza del problema no permitió aplicar del todo este tipo de métodos. Se encontró que algunos como el propuesto por Domínguez, 2002, era una posibilidad pues utiliza factores de ajuste por área para reducir la tormenta de 24 horas a 16 horas y propone la forma del hietograma, a este Método se le denominó Método de Chen-Domínguez.

Se recurrió a cuatro métodos para la construcción de los hietogramas y respectiva curva masa de las tormentas elegidas para ser calibradas: el Método de Chen-Domínguez, el Método del Soil Conservation Service (SCS) Distribución Tipo II, el Método de la Curva Masa y el Método de las Tormentas Paralelas (estos dos últimos fueron propuestos en el presente trabajo). Para ejemplificar cada método se utilizó la tormenta del 14 de septiembre de 1981:

a) Método de Chen-Domínguez

Dicho método se basa en el Método de Chen, el cual surgió a partir del Método de Bell. El Método de Chen ha sido estudiado ampliamente por Dominguez, en la República Mexicana (Mendoza, 2001). A continuación se describen ambos métodos para después abordar el Método de Chen- Domínguez.

Método de Bell

El principal interés de Bell, en crear una expresión generalizada de intensidad-duración-período de retorno fue la de contar con datos de lluvias de corta duración (menor o igual a 2 horas). Trató de evitar la incertidumbre de los métodos de extrapolación usuales para conocer la precipitación de 50 años o más, a partir de la de 10 años, aprovechando la gran cantidad de información relacionada con lluvias que se tiene en Estados Unidos.

Bell utilizó los datos previamente trabajados por el U.S. Weather Bureau (USWB), y analizó adicionalmente 157 estaciones con más de 40 años de registro para conocer la relación de la lluvia con la duración de 2 horas. Con ello encontró las relaciones que se muestran a continuación y que son válidas para $5 \text{ min} \leq t \leq 120 \text{ min}$ y $2 \text{ años} \leq T \leq 100 \text{ años}$.

$$\frac{P_T^t}{P_{10}^t} = 0.21 \ln T + 0.52 \quad (4)$$

$$\frac{P_T^t}{P_T^{60}} = 0.54 t^{0.25} - 0.50 \quad (5)$$

donde

P_T^t es la lámina de lluvia en el tiempo t , en minutos, para un período de retorno T , en años

P_{10}^t es la lámina de lluvia para el tiempo t , en minutos, y un período de retorno T , de 10 años

P_T^{60} es la lámina de lluvia para la duración t , de 60 minutos y un período de retorno T , en años

Al combinar las ecuaciones (4) y (5), Bell obtuvo la siguiente ecuación generalizada de lluvia-duración-frecuencia que funciona dentro de los rangos $5 \text{ min} \leq t \leq 120 \text{ min}$ y $2 \text{ años} \leq T \leq 100 \text{ años}$.

$$P_t^T = (0.2 \ln T + 0.52)(0.54 t^{0.25} - 0.50) P_{10}^{60} \quad (6)$$

Bell comenta que la mayoría de los valores extremos analizados están asociados a celdas de lluvia local convectiva que tienen propiedades similares en muchas partes del mundo. Por lo tanto considera que es razonable esperar consistencias de datos que permiten una generalización en alto grado para el propósito de estimación. Bell probó su fórmula en varios lugares del mundo como Australia y Sudáfrica con resultados satisfactorios; sin embargo, Chen encontró que las ecuaciones de Bell son un caso particular de la expresión matemática que él propone, la cual se describe a continuación.

Método de Chen

Chen propuso la siguiente relación para calcular la intensidad para cualquier duración y periodo de retorno:

$$R_t^T = \frac{a_1 R_1^{10} \log(10^{2-x} T^{x-1})}{(t+b)^c} \left(\frac{t}{60} \right) \quad (7)$$

donde

R_1^{10} es la lluvia registrada, en milímetros para una duración t , de una hora y período de retorno, T , de 10 años,

Se requieren conocer además, los cocientes de:

1) Lámina de lluvia-período de retorno $x = \frac{R_t^{100}}{R_t^{10}}$

R_t^{100} es la precipitación en el tiempo t (minutos) y período de retorno de 100 años

R_t^{10} es la precipitación en el tiempo t (minutos) y período de retorno de 10 años

2) Lámina de lluvia-duración $K = \frac{R_1^T}{R_{24}^T}$

(a partir de donde se obtienen los parámetros a_1, b, c , por medio de la Figura 5.18)

R_1^T es la precipitación acumulada en 1 hora y período de retorno T

R_{24}^T es la precipitación acumulada en 24 horas y período de retorno T

Chen creó dicha expresión matemática partiendo del estudio de Bell, donde demostró que las ecuaciones de Bell son un caso particular de la que él propone. Considera además, que las relaciones X (lluvia-período de retorno) y K (lluvia-duración) son independientes entre sí, y que ambas permiten describir el patrón geográfico de la lluvia. Chen encontró que fórmula de Bell, como caso particular de la ecuación 7, tiene valores de $K = 0.4$ y $X = 1.48$, los cuales considera como una condición promedio para la lluvia.

La ecuación 7 es válida para $T \geq 1$ año y $5 \text{ min} \leq t \leq 24 \text{ h}$ y requiere de los cocientes (x y K), que no considera la ecuación propuesta por Bell. El hecho de que se requieran estos cocientes, es debido a que la ecuación 7 tiene menos suposiciones en su derivación que las ecuaciones de Bell.

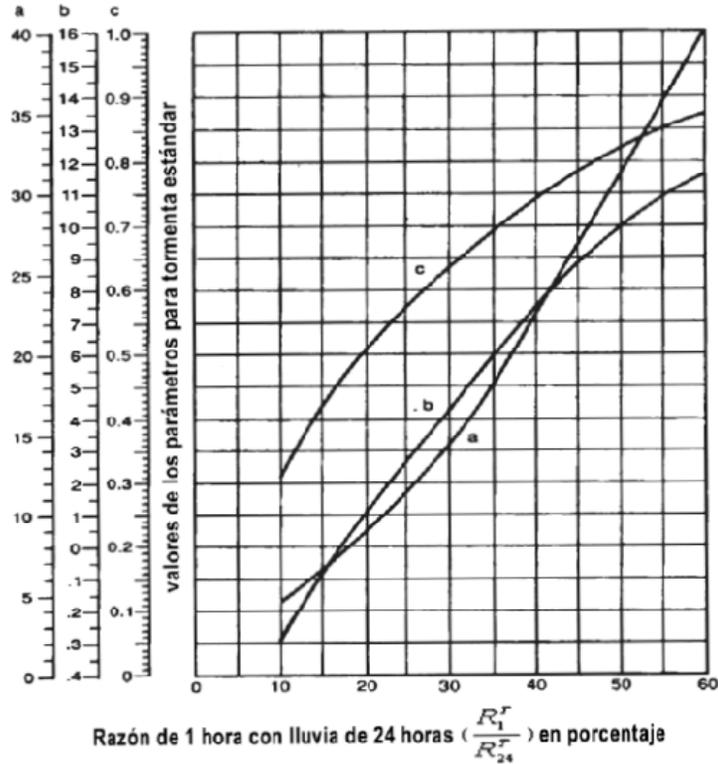


Figura 5.18 Relación entre los parámetros (a, b, c) de una tormenta estándar y la razón de la lluvia de 1 hora con la de 24 horas (Chen, 1969. Pereyra_Díaz et al, 2005).

Método de Chen-Domínguez

Dado que Chen demostró que Bell es un caso particular de la expresión que él propone, la obtención de los hietogramas para el caso de la cuenca analizada fue con el método de Chen. Para ello se recurrió a los estudios realizados por Domínguez, 2002, y Echeverri, 2007.

Domínguez, 2002, realizó un análisis regional en el país para la obtención de precipitaciones de diseño asociadas a duraciones menores de 2 horas basándose en la expresión K del método de Chen.

Domínguez comenta en el estudio que, recordando que los factores por duración (K) y por periodo de retorno (x) son independientes entre sí, se considera que los estudios regionales deben enfocarse a la determinación del factor K ya que en la mayoría de los

casos se dispone de información suficiente para obtener la precipitación asociada a una duración de 24 horas y distintos periodos de retorno, de tal manera que la relación P_T^{24}/P_{10}^{24} puede obtenerse con facilidad a partir de los datos pluviométricos de la región que se estudia, para cualquier valor del periodo de retorno, que utilizando el factor X que propone Chen.

El mismo autor ha presentado diversos estudios realizados en México referentes a la creación de un mapa del factor K para la República Mexicana (Mendoza, 2001, Domínguez, 2002, Baeza, 2007), y la calibración del Método de Chen para el Valle de México (DGCOH, 1982, Franco, 1998). En ambos casos se trabajó, por un lado, con las precipitaciones máximas anuales en 24 h y por otro, con los máximos anuales en 1 h. Se obtuvieron además, los valores correspondientes a 5, 10, 50, 100 y 500 años de periodo de retorno para finalmente obtener el cociente:

$$K = \frac{P_T^1}{P_T^{24}}$$

En la Figura 5.19 se muestran para la República Mexicana los valores del factor K agrupados en 3 clases, $K < 0.40$; $0.41 < K < 0.60$ y $K > 0.61$.

En el mismo estudio se comenta que al analizar la Figura 5.19, se observa que los valores menores de K se presentan cerca de las costas, en zonas que reciben alimentación más o menos continua de humedad, mientras que los mayores valores se presentan en zonas lejanas a las costas y protegidas de la afluencia de humedad. Domínguez propone entonces denominar a K como “factor de convectividad” para resaltar el hecho de que dicho factor es “grande” en aquellas zonas en donde no se presenta una alimentación continua de humedad y por ello la precipitación se da fundamentalmente a través de un proceso convectivo.

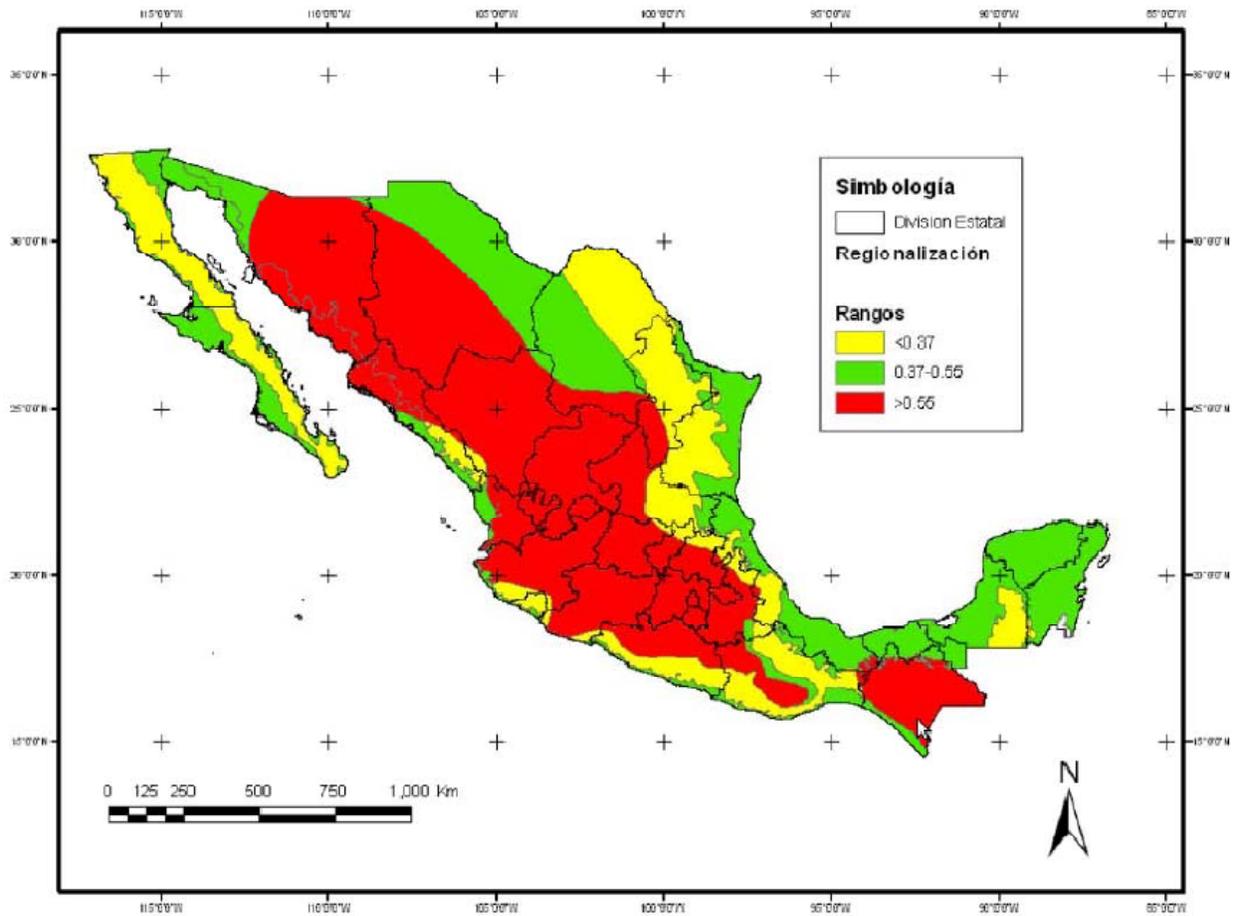


Figura 5.19 Distribución del factor K para la República Mexicana (Baeza, 2007)

Partiendo del mapa de la Figura 5.19, se muestra que para el caso de la cuenca en estudio (río Huixtla), el valor de K es menor a 0.4. Echeverri, 2007, en su estudio de las crecientes en la cuencas de la Costa del Estado de Chiapas, construyó hietogramas de diseño utilizando un factor de reducción por duración $K=0.35$, basándose en el mapa de la Figura 5.19. El factor $K=0.35$ indica que del total de la precipitación registrada en 24 horas, el 35% se presentó en una hora.

El hietograma de diseño se construye a partir del factor por duración K y la relación entre la precipitación en una hora con precipitaciones de duración de hasta dieciséis horas. En la Tabla 5.24 se muestran los valores obtenidos para cada duración, los cuales serán los que multipliquen a la lluvia medida en 24 horas.

Como se muestra en dicha tabla, esta precipitación de diseño tiene una duración de 16 horas y se distribuye cada uno de sus valores horarios empleando el Método de los Bloques Alternos propuesto por Chow, 1986, considerando que el valor central que corresponde al 35% de la precipitación, se ubica a las 12 horas.

Se decidió aplicar los valores de la Tabla 5.24 a las tormentas elegidas para calibrar, para obtener los hietogramas de entrada a KINEROS, debido a que la cuenca del Río Huixtla se encuentra en la Costa de Chiapas y por la confianza que otorga el hecho de que los ajustes del Método de Chen, realizados por Domínguez, fueron calibrados exitosamente en la cuenca del valle de México (Franco, 1998). De aquí en adelante se denominará Método Chen-Domínguez a la metodología empleada para obtener los hietogramas en la cuenca en estudio.

Tabla 5.24 Relación P_T^d/P_T^1 para $K = 0.35$

Duración, h	$P_T^d/P_T^1 * k$
1	0.350
2	0.450
3	0.490
4	0.569
5	0.596
6	0.651
7	0.692
8	0.730
9	0.777
10	0.807
11	0.853
12	0.882
13	0.918
14	0.954
15	0.974
16	1.000

A continuación se muestra a manera de ejemplo, la obtención del hietograma de diseño para la tormenta del 14 de septiembre con una lluvia registrada de 115.9 mm (ver Tabla 5.

25). La columna III es el resultado de multiplicar los valores de la columna II por el valor de la lluvia (115.9), las columnas IV y V se refieren a la aplicación del Método de los Bloques Alternos donde se acomodan las diferencias de los incrementos de hp (columna IV), buscando que los valores sean los máximos consecutivos partiendo del valor central con duración 12, con lo que se forma el hietograma de la lluvia en 24 horas (columna V). La columna VI contiene los valores de la curva masa para el hietograma obtenido en la columna V, este último grupo de valores es el que se utilizará para alimentar el modelo hidrológico KINEROS.

Tabla 5.25 Ejemplo de construcción de hietogramas y su respectiva curva masa a partir del método Chen-Domínguez

I	II	III	IV	V	VI
Duración, hr	$P_T^d / P_T^1 * K$	hp acum típica, mm	Diferencia hp , mm	hp, mm	hpacum, mm
1	0.350	40.565	40.565	2.318	2.318
2	0.450	52.155	11.590	3.0134	5.3
3	0.490	56.791	4.636	3.1293	8.5
4	0.569	65.947	9.156	3.3611	11.8
5	0.596	69.076	3.129	3.477	15.3
6	0.651	75.451	6.375	4.1724	19.5
7	0.692	80.203	4.752	4.1724	23.6
8	0.730	84.607	4.404	4.4042	28.0
9	0.777	90.054	5.447	4.7519	32.8
10	0.807	93.531	3.477	5.4473	38.2
11	0.853	98.863	5.331	9.1561	47.4
12	0.882	102.224	3.361	40.565	88.0
13	0.918	106.396	4.172	11.59	99.6
14	0.954	110.569	4.172	6.3745	105.9
15	0.974	112.887	2.318	5.3314	111.3
16	1.000	115.900	3.013	4.636	115.9

En la Figura 5. 20 se muestra la forma del hietograma y la curva masa para la lluvia del 14 de septiembre de 1981.

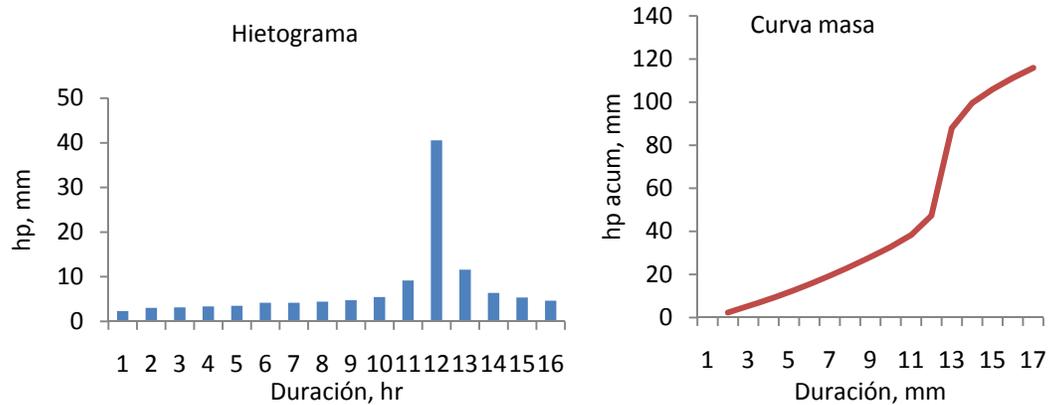


Figura 5.20 Hietograma y curva masa para la lluvia del 14 de septiembre de 1981 obtenidos con el método de Chen-Domínguez

b) Método del Soil Conservation Service (SCS) - Distribución Tipo II (USDA, 1973)

Se basa en la construcción de lluvias de diseño de 24 horas para periodos de retorno de 1 a 100 años, utilizando la distribución de lluvias de verano con respecto al tiempo, en regiones donde los escurrimientos importantes son provocados por este tipo de lluvias en cuencas pequeñas. Los datos de lluvia utilizados para generar dicha distribución fue tomada de registros en cuencas menores a 1036 km², para duraciones hasta 24 horas y frecuencias de 1 a 100 años. Miller et al, 2002 comenta que este tipo de distribución es apropiada para obtener la distribución de la lluvia en el tiempo en una gran porción del área de Estados Unidos, incluyendo todo el interior el Oeste. En la Tabla 5.26 se muestra la distribución de lluvia acumulada para 24 horas y en la Figura 5.21 la gráfica de dicha distribución junto con la distribución tipo I que corresponde a regiones con clima marítimo y otras distribuciones obtenidas para diferentes regiones de Estado Unidos.

Este método tiene la conveniencia de que el programa KINEROS lo calcula directamente en la opción 4) *Generación de un evento a partir de la profundidad de lluvia con período de retorno único*, en el módulo de Generación de lluvia, dentro del programa AGWA (subcapítulo 5.2.1.1).

Tabla 5.26 Acumulación de lluvia en 24 horas (USDA, 1973)

Tiempo, hr	P_x/P_{24}
0	0
2	0.022
4	0.048
6	0.08
7	
8	0.12
8.5	
9	0.147
9.5	0.163
9.75	
10	0.181
10.5	0.204
11	0.235
11.5	0.283
11.75	0.387
12	0.663
12.5	0.735
13	0.772
13.5	0.799
14	0.82
16	0.88
20	0.952
24	1

La forma del hietograma y la curva masa, para el caso de la tormenta del 14 de septiembre de 1981 se muestra en la Figura 5.22.

c) Método de la Curva Masa

Este método se apoya en el análisis de las lluvias horarias obtenidas en el Observatorio Meteorológico de Tapachula, la cual se encuentra a 32 km aproximadamente de la estación climatológica de Huixtla.

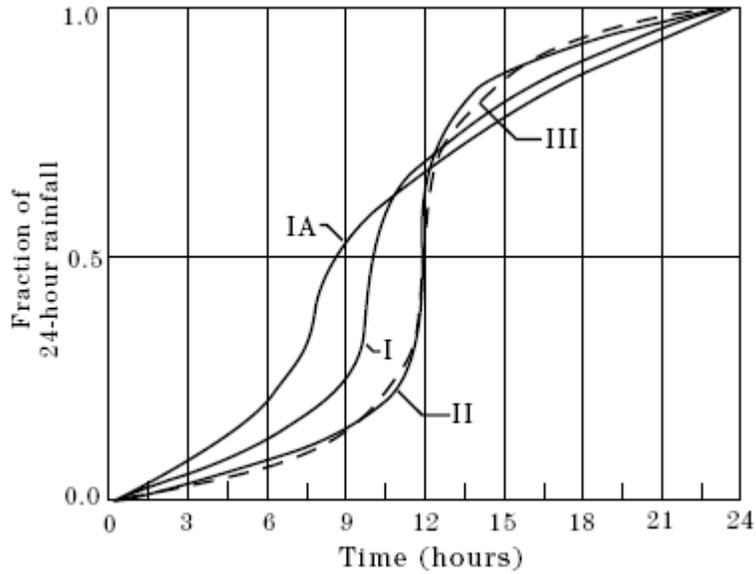


Figura 5.21 Tipos de distribución para lluvias en 24 horas (SCS) (USDA, 1986)

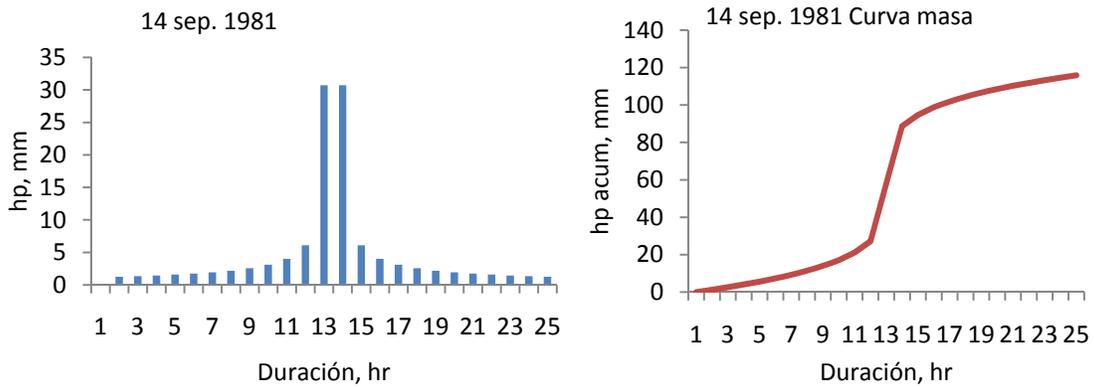


Figura 5.22 Hietograma y curva masa para la lluvia del 14 de septiembre de 1981 obtenidos con el método del SCS Tipo II

Se recurrió a los registros de lluvia horaria del Observatorio Climatológico de Tapachula, debido a la cercanía con Huixtla y porque ambos puntos se localizan en la Costa de Chiapas el cual presenta un patrón de lluvia similar a todo lo largo por tener las mismas características fisiográficas y climatológicas.

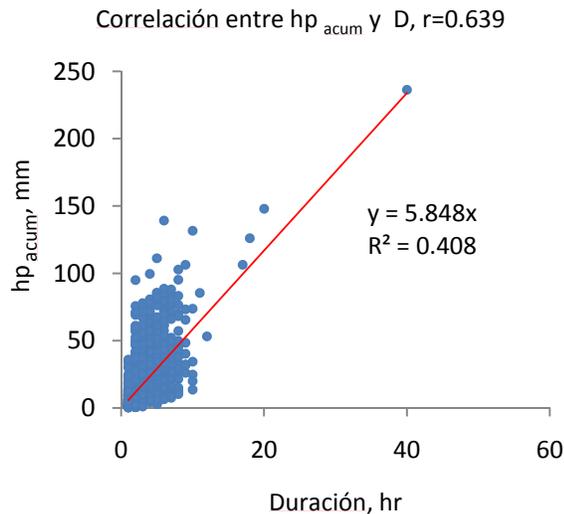
Por esa razón, se considera válido tomar como referencia a las lluvias registradas en la estación de Tapachula. El registro abarcó el período del primero de enero de 1981 al 31 de mayo de 2004, con algunos vacíos en el registro.

El método fue creado para tener flexibilidad en la duración total del hietograma. Consta de dos etapas:

- i. Obtención de la duración total D , del hietograma, en horas

Se analizó la lluvia horaria y la duración de las 1826 tormentas que se presentaron dentro del período de registro de 23 años mencionado, entre los meses de mayo y octubre, por ser la época del año con mayor lluvia.

El valor de la duración total del hietograma se obtiene a partir de la correlación siguiente:



donde se encontró que el mejor ajuste fue con la ecuación $y = 5.848x$, que equivale a $hp_{acum} = 5.848 D$ y que despejando la duración D queda como:

$$D = \frac{hp_{acum}}{5.848}$$

Cabe recordar que hp_{acum} corresponde a la lluvia acumulada en 24 horas.

La correlación fue obtenida entre los 1826 pares de datos de h_{psum} y D , graficando a la duración D en el eje de las abscisas ($x=D$) y a h_{psum} en el de las ordenadas ($y=h_{psum}$). Haciendo uso de las ayudas de Excel, se obtuvo la correlación lineal obligando que la línea de correlación pasara por el origen.

ii. Obtención de la forma del hietograma

La forma se obtiene multiplicando a la lluvia acumulada en 24 horas, por los valores de la curva masa típica correspondiente a la duración D obtenida en el inciso anterior.

La obtención de las curvas masa típicas para diferentes duraciones fue por medio del análisis de 1426 eventos de lluvia menores a 24 horas, en el período de mayo a octubre de cada año, registrados en el Observatorio Climatológico de Tapachula.

A manera de ejemplo se presenta el cálculo de la curva masa típica obtenida para una duración total de 3 horas. En primer lugar se calculó la curva masa para cada evento de lluvia con duración D (para el ejemplo sería igual a o menor a 3 horas). En la siguiente tabla se muestra la obtención de la curva masa para la tormenta del 29 de junio de 1983), donde aparecen los valores horarios registrados para la tormenta (hp 1hr), le siguen en el siguiente renglón los valores acumulados de dicha lluvia (hp acum) y en el último renglón se calcula el porcentaje (% hp acum) de dichos valores acumulados.

Fecha	Duración, hr		
29/06/1983	1	2	3
hp 1hr	65	10	0.6
hp acum	65	75	75.6
% hp acum	0.86	0.99	1.0

En lo que respecta a los valores acumulados de lluvia obtenidos en la tabla anterior, es importante mencionar que su acumulación es de acuerdo con el Método de

Chicago (Tholin et al, 1959). Con la finalidad de obtener la curva masa típica para diferentes duraciones, D, dicho método propone la suma de los valores consecutivos de lluvia para diferentes duraciones D, y así obtener un valor ponderado para cada duración desde 1 horas hasta 24 horas. En la siguiente tabla se ejemplifica la acumulación de la lluvia horaria de una tormenta ficticia (en este caso, cuando el máximo de la lluvia se presenta en la tercera hora), aplicando el Método de Chicago, dado que en la tormenta del 29 de junio de 1983 no es clara su aplicación en este aspecto pues la lluvia máxima se presenta en la primera hora de la tormenta.

Fecha	Duración, hr				
Tormenta ficticia	1	2	3	4	5
hp 1hr	3.5	3.4	19.5	2.8	1.3
hp acum	19.5	22.9	26.4	29.2	30.5

Se observa que la lluvia máxima se presenta en la tercera hora de duración de la tormenta, entonces el primer valor acumulado para D=1 hr es 19.5 mm. El segundo valor acumulado que representa el valor máximo de dos valores acumulados para una duración D=2 hr, corresponde a la suma de 19.5 mm más el valor descendente consecutivo, es decir 3.4 mm, por lo que el valor acumulado es (19.5 mm + 3.4 mm = 22.9 mm). El valor máximo acumulado de tres valores consecutivos de lluvia para D=3 hr es entonces 19.5 mm + 3.4 mm + 3.5 mm=26.4, para una duración D=4hr, el valor máximo acumulado de la lluvia es 29.2 mm = 19.5 mm + 3.4 mm + 3.5 mm + 2.8 mm, por último, las suma de los valores máximos acumulados para la duración total de la tormenta D=5 hr es 19.5 mm + 3.4 mm + 3.5 mm + 2.8 mm + 1.3 mm = 30.5 mm (lluvia total de la tormenta).

Este procedimiento se debe realizar al acumular la lluvia de cada tormenta analizada.

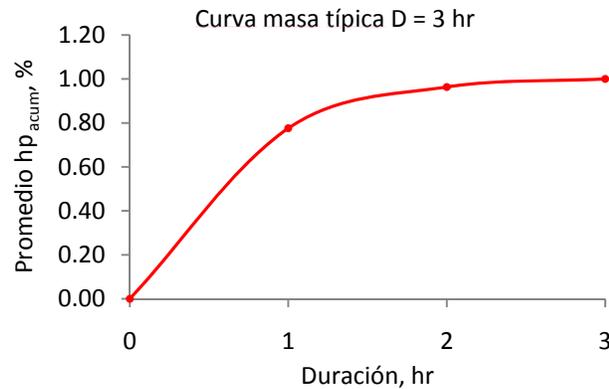
Regresando al ejemplo para obtener la curva masa típica con una duración de 3 horas, se calculó en segundo lugar, el promedio de los porcentajes de la lluvia acumulada (% hp acum) de todas las tormentas con duración entre 1 hora y 3 horas. En la tabla que

aparece a continuación se observa el cálculo de dicho promedio, suponiendo que se tienen en total 4 tormentas con duración $D=3$ hr en todo el registro de tormentas.

Promedio de los porcentajes de hp acum, (% hp acum)

Fecha	Duración, hr		
	1	2	3
03/05/1981	0.66	0.86	1.0
06/08/19861	1.0	1.0	1.0
07/09/1993	0.76	0.99	1.0
19/06/1995	0.68	1.0	1.0
Promedio	0.78	0.96	1.0

En tercer lugar, se graficaron los valores de duración D , de 1 a 3 horas, respecto a los valores promedio de los porcentajes de valor acumulado de lluvia según se obtuvieron en la tabla anterior. La curva que aparece en la siguiente figura representa la curva masa típica para una duración de 3 horas.



Finalmente, cada valor obtenido en la curva masa típica, obtenido para una determinada duración D (en este caso para $D=3$), se multiplica por la lluvia acumulada en 24 horas (es decir, el valor de lluvia en 24 horas registrado en la estación meteorológica de Huixtla), para obtener la curva masa real del evento de lluvia analizado.

En la Figura 5.23, se muestra el hietograma y curva masa obtenidos con el método de la Curva Masa para la lluvia del 14 de septiembre de 1981.

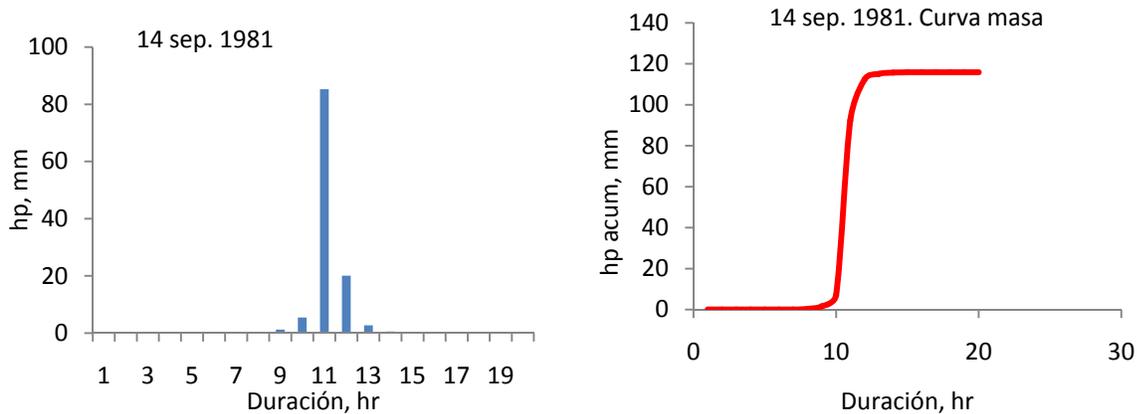


Figura 5.23 Hietograma y curva masa para la lluvia del 14 de septiembre de 1981 obtenidos con el método de la Curva Masa

d) Método de la Tormenta Paralela

Se buscó la correspondencia entre las lluvias en 24 horas de Huixtla y su equivalente tormenta de lluvia horaria en Tapachula.

Por ejemplo, para el evento del 14 de septiembre de 1981 en Huixtla, se registraron 115.9 mm de lluvia en 24 horas, mientras que en el mismo día se registraron 12.6 mm en Tapachula con 2 horas de duración.

La tormenta de dos horas registrada en Tapachula se muestra en la siguiente tabla. Se despliega en primer lugar, la lluvia horaria registrada para las dos horas de duración, posteriormente se calculó la lluvia acumulada (hp_{acum}) para cada duración y el porcentaje que representa dicho valor de lluvia acumulada para cada duración (cociente) respecto al total de la lluvia. Finalmente, dichos valores de porcentaje obtenidos para cada duración de la tormenta en Tapachula, son multiplicados por el valor de lluvia en 24 horas registrado en Huixtla, con lo que se obtiene un equivalente de lo que llovió en Tapachula trasnpuesto a Huixtla (última columna de la tabla).

Tapachula				Huixtla
D,hr	hp _{1hr} , mm	hp _{acum} , mm	cociente	hp _{acum} , mm
1	11.6	11.6	0.92	106.7
2	1	12.6	1.00	115.9

De esta manera, se obtuvieron los eventos de lluvia paralelos de las tormentas elegidas que serán corridas en KINEROS para su calibración (Tabla 5.27).

Cabe hacer la aclaración de que en el caso de la lluvia del 14 de septiembre de 1981, dado que la duración de la lluvia registrada en Tapachula fue muy pequeña (2 horas), se optó por buscar en el registro de Tapachula, una tormenta equivalente que tuviera la misma o magnitud aproximada de lluvia de 115.9 mm (registrada en Huixtla), pero con una duración mayor a 2 horas.

Tabla 5.27 Eventos de lluvia paralela en Tapachula correspondientes a cada lluvia en Huixtla

Núm.	Fecha tormental		hp _{24 hr} , mm	hp _{acum} , mm	D, hr
			Huixtla	Tapach.	
1	1981	14-Sep	115.9	12.6	2
2	1982	24-Sep	69.2	73.8	10
3	1987	27-Sep	44.0	11.0	4
4	1988	02-Sep	135.1	106.4	17
5	1990	12-Sep	42.2	2.3	1
6	1996	27-Sep	19.1	82.0	5

A continuación se muestra la curva masa de la lluvia equivalente registrada en Tapachula correspondiente al 14 de septiembre de 1981 (Figura 5.24).

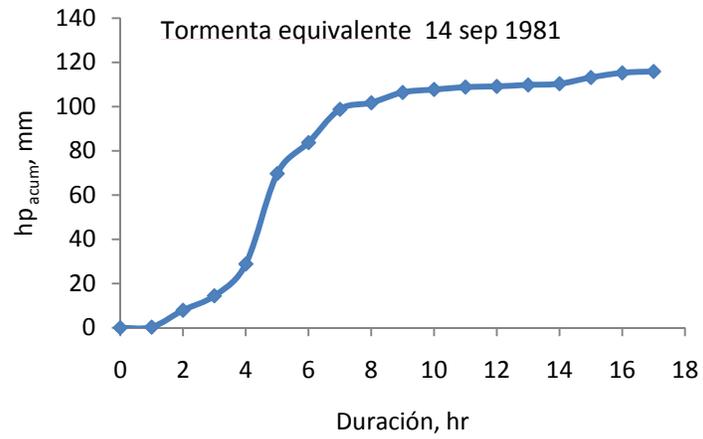


Figura 5.24 Curva masa para la lluvia del 14 de septiembre de 1981 obtenida con el método de la tormenta paralela

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Corridas de selección del mejor método para la construcción de hietogramas

Una vez obtenidos los hietogramas y curvas masa para cada método propuesto y para cada tormenta elegida, se procedió a correr AGWA-KINEROS con el fin de observar el desempeño de la lluvia en su transformación a escurrimiento y elegir el mejor método que proporcionará el hietograma y su respectiva curva masa, que servirá como dato de entrada para hacer las corridas de calibración. En la Tabla 6.1 se muestran las corridas de las tormentas que caen dentro de la década de los años ochenta. En ella se encuentran los resultados del gasto pico calculado (Q_p calculado) con el programa AGWA-KINEROS, junto con los valores de gasto pico registrados (Q_p rmedido) en la estación climatológica Huixtla y su porcentaje de variación (% variación) entre ambos valores como una medida de comparación. La corrida de cada tormenta se realizó para dos valores extremos del índice de saturación (S_i) (entre 0.2 y 0.5 como extremo inferior y entre 0.9 y 0.99 como extremo superior), con la finalidad de encontrar los rangos en que se produce el escurrimiento y así reconocer si los hietogramas pudieron simular el gasto pico registrado. También se tomó en cuenta el gasto base (Q_b) estimado a partir del comportamiento del hidrograma del gasto medio diario a lo largo de varios meses, considerando la fecha de ocurrencia de la tormenta de interés (subcapítulo 5.5.4).

Es importante mencionar que las corridas realizadas para el propósito de este subcapítulo no tienen la intención de encontrar el índice de saturación que mejor ajuste el gasto pico calculado con el gasto pico registrado, lo cual representa una calibración, sino se busca encontrar la variación de los gastos pico calculados para los dos valores extremos del índice de saturación y de esta manera averiguar si existe una posible aproximación a los valores de gasto pico registrados. Por lo tanto los valores del porcentaje de variación ayudan a encontrar los límites máximos de la variación entre el gasto pico calculado y el registrado. Dichos valores se encuentran sombreados en amarillo en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Resultados de las corridas de AGWA-KINEROS utilizando los métodos propuestos para construir hietogramas. Tormentas de la década de los años ochenta

	Fecha 14-Sep-81			Fecha 27-Sep-87			Fecha 02-Sep-88		
	hp,mm	Q _p medido, m ³ /s	Q _b , m ³ /s	hp,mm	Q _p medido, m ³ /s	Q _b , m ³ /s	hp,mm	Q _p medido, m ³ /s	Q _b , m ³ /s
	115.9	266.5	36	44	84.2	13.2	135.1	417.8	26.5
Método Hietograma	S _I	Q _p calculado, m ³ /s	% variación	S _I	Q _p calculado, m ³ /s	% variación	S _I	Q _p calculado, m ³ /s	% variación
Chen-Domínguez	0.5	50.1		0.55	13.2		0.2	58.0	
	0.99	443.7	66.5	0.99	15.9	-81.2	0.99	688.5	64.8
SCS Tipo II	0.5	61.0		0.55	13.2		0.2	195.8	
	0.99	391.3	28.2	0.99	21.8	-74.1	0.92	830.4	98.8
Curva masa	0.2	1080.2	305.4	0.55	13.5		0.2	1946.9	366.0
	0.9	2423.8		0.99	136.6	62.3	0.99	3808.8	
Tormenta paralela en Tapachula	0.2	46.0		0.55	15.2		0.2	85.3	
	0.99	486.1	30.2	0.99	103.1	22.5	0.99	787.0	88.4

Así por ejemplo para el caso de la tormenta del 14 de septiembre de 1981, se observa que todos los métodos utilizados para la construcción de hietogramas funcionan adecuadamente, a excepción del de la Curva Media, pues los valores de Q_p calculado (1080.2 m³/s y 2423.8 m³/s para $S_i = 0.2$ y 0.9 respectivamente) están sobrestimados y es imposible conseguir el valor de Q_p medido (266.5 m³/s) aun asignando un índice de saturación bajo ($S_i = 0.2$). En el caso del 27 de septiembre de 1987, los métodos que no funcionaron fueron el de Chen-Domínguez y el del SCS Tipo II pues los resultados obtenidos están subestimados, y para la tormenta del 2 de septiembre de 1988, el método que no funcionó fue el de la Curva Masa al sobrestimar los resultados (como ocurrió en la tormenta de 1987).

Resumiendo el análisis de los resultados que se muestran en la Tabla 6.1, los Métodos Chen-Domínguez y SCS Tipo II mostraron valores aceptables de gasto pico estimado dentro de los rangos de índice de saturación manejados para los eventos de lluvia de 1981 y 1988. Por otro lado, los hietogramas obtenidos con el Método de la Curva Masa arrojaron gastos pico estimados que son válidos para la tormenta de 1987. El método que permaneció constante, es decir, que no subestimó ni sobrestimó los resultados fue el de las Tormentas Paralelas, pues en todos los casos se puede variar el valor del índice de saturación entre 0.2 y 0.99 para conseguir el valor de Q_p calculado que más se aproxime al Q_p estimado. Por lo que se acepta este método como el indicado para hacer las corridas de calibración de AGWA-KINEROS.

Se concluye (también con base en resultados obtenidos para la década de los años noventa al analizar las tormentas del 27 y 28 de junio de 1996, donde muestran que se comportan como la tormenta de 1987), que tanto el Método de Chen-Domínguez como el SCS Tipo II funcionan de manera aceptable para tormentas típicas, esto es, aquellas lluvias que provocan escurrimientos no despreciables e inclusive importantes. En cambio, el Método de la Curva Masa funciona para eventos poco significativos, con poca cantidad de lluvia que producen un gasto pico relativamente bajo. Por último, el Método de la Tormenta Paralela puede funcionar para cualquier tipo de tormenta.

Cabe mencionar que todos los métodos analizados, a excepción del de la Tormenta Paralela, corresponden a métodos para estimar lluvias de diseño. Se decidió utilizar dichos métodos por

la forma de la curva masa (en forma de “S” esbelta), que se construye a partir del hietograma creado (como se puede apreciar en las curvas masa calculadas para las tormentas de calibración seleccionadas). La forma de la curva masa es fundamental para saber cómo se concentra la lluvia a lo largo del tiempo. No es lo mismo obtener la forma de una curva masa tendida a tener una de forma esbelta para una misma cantidad de lluvia. Esta última forma indica que la lluvia se concentra en menor tiempo y son las que producen escurrimientos importantes en una cuenca, razón por la cual se utilizan para el diseño de obras hidráulicas. Si se hubieran utilizado curvas masa de forma tendida, no se hubiera presentado un escurrimiento aceptable a la salida de la cuenca, pues dicha forma tiende a representar una lluvia constante.

Por otro lado, se considera que el Método de la Tormenta Paralela es una buena opción para crear hietogramas de entrada para la calibración de métodos como AWGA-KINEROS, dado que es lo que más se acerca a la realidad de cómo se pudo haber manifestado la lluvia (en este caso en Huixtla).

De aquí se desprende que con la aplicación de los métodos empleados, se logró nutrir al programa con eventos de lluvia menores a 24 horas a partir de la lluvia diaria registrada en la estación climatológica Huixtla y con ayuda de la estación cercana de registros horarios en Tapachula . Sin embargo, como se comentó anteriormente, se procederá a calibrar el modelo AGWA-KINEROS utilizando los hietogramas obtenidos con el Método de la Tormenta Paralela por ser lo más apegado a la realidad. Aun cuando los otros métodos hubieran arrojado buenos resultados en todas las tormentas, el método elegido seguiría siendo el mismo, dada la razón comentada.

6.2 Calibración de AGWA-KINEROS

Calibrar el modelo hidrológico AGWA-KINEROS permite tener la certeza de que los resultados que se obtengan en cualquier estudio hidrológico de la cuenca serán lo más representativos al comportamiento real de ésta.

Conforme al subcapítulo 5.3, Kalin et al, 2003, propone que la calibración de los parámetros de entrada del modelo sea en primer lugar para ajustar los tiempos del hidrograma y en segundo lugar, para ajustar su volumen. Dado que el único parámetro con que se cuenta es el valor del gasto pico, se procede a ajustar el índice de saturación S_i , como parte de la segunda etapa de ajuste, considerando también que Hantush et al, 2005, menciona que este parámetro es el más sensible para la obtención del gasto pico, así como para el volumen total de escurrimiento y tormentas con intensidad baja y alta.

Se procedió entonces a ajustar el S_i de cada tormenta que se eligió para ser calibrada, al comparar el gasto pico medido de cada tormenta, con el gasto pico calculado por AGWA-KINEROS. Cabe mencionar en este punto, que los valores iniciales obtenidos no fueron de gran ayuda ya que con el análisis realizado para elegir el método más adecuado en la construcción de hietogramas, se tuvo una mejor idea del orden en que podía estar el valor del índice de saturación. También cabe recordar que es válido que S_i varíe para cada tormenta, es decir, que no se considere como un valor constante para todas las tormentas (Kalin et al, 2003).

En la Tabla 6.2 se muestran los valores calibrados del índice de saturación para cada tormenta elegida para dicho fin. En la misma tabla aparecen los datos de la lluvia en 24 horas (hp_{24hr}) registrada para cada tormenta, el gastos pico medido $Q_{p \text{ medido}}$ en la estación climatológica de Huixtla y el estimado $Q_{p \text{ estimado}}$ por KINEROS, el porcentaje de variación (% variación), así como la duración D de la tormenta.

Del total de ocho tormentas analizadas, a 4 tormentas les corresponde un escurrimiento mayor a $100 \text{ m}^3/\text{s}$, debido a la lluvia generada, las 4 restantes registraron un valor de lluvia que no produjo un escurrimiento importante. Se puede apreciar que el porcentaje de variación entre el gasto pico registrado y el gasto pico estimado por KINEROS de cada tormenta varía entre 0.5 % hasta 55.3 % (en valor absoluto), con dos valores por arriba del 20 %. El valor de 55.3 % presentado en la tormenta del 27 de septiembre de 1996 es considerado un caso particular, pues aun cuando la tormenta tuvo una duración total $D = 1 \text{ hr}$ (lo que significa que el 100% de la lluvia se concentra en 1 hora por lo que se trata de una tormenta intensa), nunca se pudo

obtener una buena aproximación entre el gasto pico registrado y calculado, es decir, que fue imposible alcanzar el gasto pico medido ($51.1 \text{ m}^3/\text{s}$) con el valor de lluvia registrado de 19.1 mm. Revisando los registros de esta tormenta, se encontró que un día antes del 27 de septiembre se presentó una lluvia de 76.1 mm. Esto significa que el gasto registrado el día 27 fue generado por la lluvia del día 26 de 76.1 mm, y por lo tanto no pudo ser originado por la lluvia registrada el mismo día 27 que fue de 19.1 mm. Con esto se muestra la importancia de escoger adecuadamente las tormentas a calibrar, ya que la lluvia registrada en la fecha elegida debe ser la detonadora del escurrimiento del mismo día.

Tabla 6.2 Resultados de las corridas de AGWA-KINEROS para calibrar el índice de saturación, S_i para cada tormenta seleccionada para dicho fin

Núm.	Fecha tormenta	hp _{24hr} ,mm	Q _p , m ³ /s (medido)	Índice de saturación, S _i	Q _p , m ³ /s (estimado)	% variación	D, hr
1	14-Sep-81	115.9	266.5	0.9299	195.6	-26.6	17
2	24-Sep-82	69.2	332.9	0.86	336.7	1.2	4
3	27-Sep-87	44	84.2	0.919999	73.8	-12.4	4
4	02-Sep-88	135.1	417.8	0.929999	375.9	-10.0	17
5	12-Sep-90	42.2	172.1	0.95	135.9	-21.0	3
6	09-Oct-91	24.9	23.1	0.95	18.9	-18.3	2
7	30-Jun-93	57.8	31.3	0.58	31.5	0.5	5
8	27-Sep-96	19.1	51.1	0.950	22.8	-55.3	1

Descartando la tormenta del 27 de septiembre de 1996, se tiene que la variación máxima para las demás tormentas es de 26.6 % (en valor absoluto) y corresponde al 14 de septiembre de 1981. Se considera que este valor de variación es aceptable, inclusive hasta un 30 %, pues la cantidad y calidad de información que se introdujo como datos de entrada fue insuficiente para lo que demanda el programa, debido a que la cuenca analizada es una cuenca semi-instrumentada. Los valores de variación entre el gasto pico estimado y medido, con respecto a la lluvia precipitada para cada tormenta se muestran en la Figura 6.1. Se observa que los valores de gasto pico estimados por KINEROS para 5 de las 7 tormentas fueron subestimados (el 71 % del total de las tormentas calibradas), mientras que solo 2 fueron sobrestimados. Al respecto no hubo ninguna diferenciación en cuanto al tipo de evento, siendo de poca o mucha

lluvia. Las tormentas que tuvieron el mejor ajuste fueron la del 24 de septiembre de 1982 y la del 30 de junio de 1993.

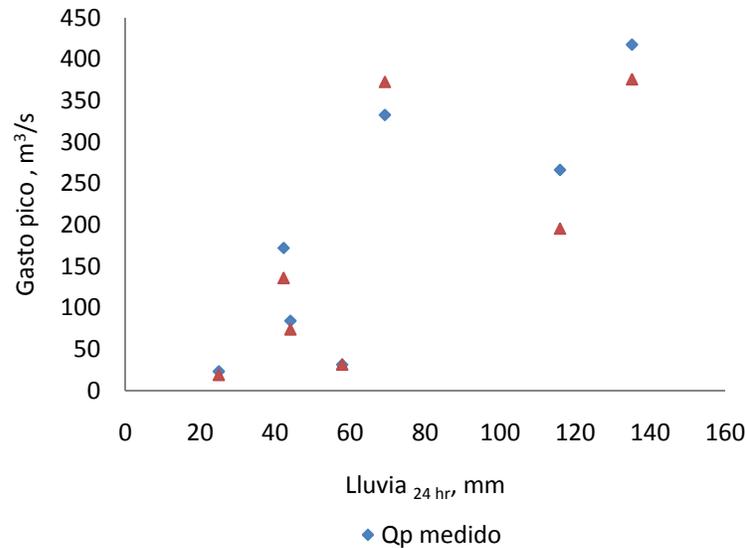


Figura 6.1 Comparación entre los valores de gasto pico medido y estimado con respecto a la lluvia simulada para cada tormenta analizada

6.3 Sensibilidad de los parámetros de entrada

Se observa en la Tabla 6.2, que la mayoría de los valores del índice de saturación están por arriba del 90%. Además, uno de los aspectos que resaltan en la columna de S_i , son los valores hasta con 6 decimales. Esto se debe a que justo ese número de decimales son los que proporcionan el valor de $Q_{p \text{ estimado}}$ más cercano al $Q_{p \text{ medido}}$, es decir, no es posible redondear el valor de S_i , pues el $Q_{p \text{ estimado}}$ sería muy diferente. Se tiene por ejemplo para la tormenta del 2 de septiembre de 1988, que si se redondea el valor de $S_i = 0.929999$ a $S_i = 0.93$, entonces el gasto pico estimado se incrementa de $375.9 \text{ m}^3/\text{s}$ a $786.9 \text{ m}^3/\text{s}$. Algo similar ocurre con la tormenta de 1987 pues si se redondea el valor de $S_i = 0.919999$ a $S_i = 0.92$, el gasto pico estimado se incrementa de $73.8 \text{ m}^3/\text{s}$ a $103.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Este comportamiento del índice de saturación es un posible reflejo de los aspectos ligados al tamaño de la cuenca, la falta de información detallada en suelos, al tipo de clima en la cuenca (tropical húmedo) e inclusive a la lluvia uniformemente distribuida, por contar únicamente

con una estación pluviométrica. Por un lado se tiene que el mapa de suelos de FAO se encuentra a una escala 1:5,000,000, y que por lo tanto reduce el universo de suelos en la cuenca a sólo tres, predominando los Andosoles cuya permeabilidad es en general alta, cubriendo el 84.3 % de la cuenca representado 296.56 km² del área total, siendo dos veces el área máxima con que trabaja KINEROS (100 km²). De esta manera, es probable que el comportamiento de los Andosoles ante la excesiva saturación del suelo (los índices de saturación son mayores al 90 %) e infiltración representada por la conductividad hidráulica a saturación (en Andosoles se han reportado valores de 1.6 m/d en México, Raymundo, 2008), pueda provocar un desajuste en el modelo al ser aplicada la fórmula Smith y Parlange que simula el proceso de infiltración. Cabe recordar que KINEROS fue concebido para trabajar en cuencas áridas y semiáridas donde normalmente los índices de saturación iniciales son bajos. Al respecto, Kalin et al. 2006 menciona que el modelo es menos confiable bajo condiciones de humedad iniciales del suelo. Por lo que se concluye que el índice de saturación es sensible e inestable cuando hay una alta saturación del suelo.

En cuanto a la lluvia uniforme, Goodrich et al., 2000 y Smith et al., 1995 mencionan que para cuencas mayores a los 100 km², la aplicación de un modelo tan detallado como KINEROS, y ante la falta de una distribución adecuada de la lluvia, puede dar resultados comparables a un modelo simple que no vincula una caracterización detallada de la cuenca como la requerida con los datos de entrada de KINEROS. Al respecto, se considera que la simulación del modelo, utilizando lluvia uniforme de la estación de Huixtla, condujo a valores razonables de escurrimiento con un error del 30%, que se atribuye a la cantidad y calidad de información utilizada.

En lo que respecta a la duración y forma de las tormentas, al no contar siempre con la tormenta paralela en el Observatorio Meteorológico de Tapachula de la lluvia que ocurrió en Huixtla, se recurrió a buscar en el mismo registro de lluvias horarias de Tapachula, alguna tormenta que presentara la misma magnitud total de lluvia de la tormenta a calibrar y considerarla como una tormenta equivalente a la que se presentó en Huixtla. Esta situación condujo a realizar un ajuste de la duración y forma del hietograma, para elegir el que ofreciera el mejor valor de gasto pico en las corridas de AGWA-KINEROS.

En la Tabla 6.3 se presenta un ejemplo de dicho ajuste para el caso de la tormenta del 24 de septiembre de 1982, con un valor inicial de $S_i=0.95$ para todas las corridas. Se partió de la corrida de la tormenta paralela en Tapachula registrada la misma fecha del 24 de septiembre, que se presentó con una duración total $D=10$ hr y su valor máximo de lluvia se presentó en la primera hora ($d=1$ hr) de la duración total de la tormenta. Al correr AGWA-KINEROS con el hietograma de esta tormenta se obtuvo un gasto estimado de $177.6 \text{ m}^3/\text{s}$, que comparado con el gasto registrado de $332.9 \text{ m}^3/\text{s}$, es imposible lograr una mejor aproximación al calibrar $S_i=0.95$, pues este valor se encuentra muy cercano a la saturación al 100% y no da margen de variación para obtener una mejor aproximación de los gastos. Por lo tanto, se procedió a buscar una tormenta equivalente en la misma base de datos horarios de lluvia, que cumpliera con la característica de incluir una lluvia total igual a la que se presentó en Huixtla, correr su hietograma, y comparar el gasto estimado con el calculado. Esta secuencia se hizo hasta encontrar aquella tormenta (en este caso fue la del 1 de agosto de 1988), que diera margen para variar los valores de S_i y así mejorar el valor de salida del gasto pico del modelo. El valor final de S_i , después de calibrarlo fue de 0.88, dando como resultado $372.7 \text{ m}^3/\text{s}$ en el gasto pico de salida estimado por KINEROS.

Tabla 6.3 Ajuste de duración y forma de la tormenta del 24 de septiembre de 1982

Fecha tormenta			
24-Sep-82			
hp,mm	Q_p (registrado), m^3/s	Indice de saturación, S_i	
69.2	332.9	0.95	
Q_p (calculado), m^3/s	Duración, D, hr	duración, d, hr	Observaciones
177.6	10	1	Torm. paralela 24 sep 82
251.8	8	2	Torm. equivalente 22/10/1991
197.6	8	1	Torm. equivalente 29/09/1992
232.1	7	3	Torm. equivalente 04/05/1990
118.6	6	4	Torm. equivalente 18/07/1996
663.4	4	2	Torm. equivalente 01/08/1988 ELEGIDA PARA CALIBRAR S_i

En la misma tabla se puede observar que el gasto pico estimado con la menor aproximación al gasto pico registrado fue el del 18 de julio de 1996, con $118.6 \text{ m}^3/\text{s}$, una duración total $D=6$ hr

y una duración a la lluvia máxima de la tormenta de $d=4$ hr. Esto quiere decir que la duración y forma de la tormenta influyeron para obtener el valor más bajo en el gasto pico calculado, comparado con las otras tormentas alternativas. El efecto en la tormenta fue dado por el tiempo en que se presenta la lluvia máxima, la cual ocurrió después de la mitad de la duración total de la tormenta.

Por lo tanto, se encontró que el tipo de hietogramas que mejor funcionaron al armar tormentas equivalentes con las lluvias horarias de Tapachula, fue aquel que presentaba la lluvia horaria máxima en las primeras horas de la duración total de la tormenta. Los resultados de escurrimiento entre una tormenta con estas características y la misma tormenta, pero con una variación en la posición de la lluvia máxima horaria con respecto a la duración total, pudo marcar la diferencia en gastos para aproximarse al gasto pico registrado.

Las tormentas de la década de los años noventa se caracterizaron por tener una duración corta en los hietogramas. Esto es una consecuencia lógica del hecho que las tormentas que se presentaron en esos años y su respuesta en escurrimiento no tuvieron trascendencia hidrológica (poco escurrimiento), a excepción del año de 1998, cuando ocurrió el desastre en la Costa de Chiapas por las inundaciones y movimientos en masa que fueron detonadas por lluvias extraordinarias. Lamentablemente, no se contaron con registros de escurrimiento para esas fechas, por lo que no está contemplada dicha tormenta.

6.4 Análisis de frecuencias de la lluvia horaria (en forma de lluvia acumulada), registrada en el Observatorio Meteorológico de Tapachula

Dicho análisis se realizó gracias al estudio sobre las tormentas horarias registradas en el Observatorio Meteorológico de Tapachula para obtener la curva masa típica para diferentes duraciones.

Al analizar 1414 tormentas, se encontraron las siguientes características:

- i) En el momento en que ocurre la lluvia máxima horaria, $hp_{m\acute{a}x}$, durante la tormenta, se ha acumulado un 70 % de la lluvia total precipitada.

- ii) La duración, d , en que ocurre la lluvia máxima, se presenta en promedio a 0.40 de la duración total, D .
- iii) La duración total que con mayor frecuencia se presenta en las tormentas de cualquier magnitud es entre 5 y 6 horas.

En la Figura 6.2 se muestra un ejemplo de la obtención de la frecuencia de la duración total para diferentes rangos de lluvia acumulada hp_{acum} , en este caso es entre 60.1 mm y 70 mm.

Los datos mencionados anteriormente nos indican que las tormentas que se presentan en Tapachula con duración total menor o igual a 24 horas, tienen la característica de concentrar la mayor parte de la lluvia que descarga la tormenta al principio de su ocurrencia, de tal manera que los valores altos de precipitación se presentan desde las primeras horas de inicio de la lluvia; otra característica es que la lluvia máxima ocurre antes de que haya pasado la mitad del tiempo de la duración total de la tormenta, además de que en las tormentas a presentarse, existe una frecuencia con una duración total entre 5 y 6 horas. Con estas características se infiere que las tormentas en Tapachula pueden provocar inundaciones importantes cuando se presenta una magnitud considerable de lluvia ya que la energía de ésta es liberada al principio de la tormenta y no al final, con ello la cuenca del Río Coatán, donde se encuentra ubicada la población de Tapachula, responde con un rápido incremento en el escurrimiento.

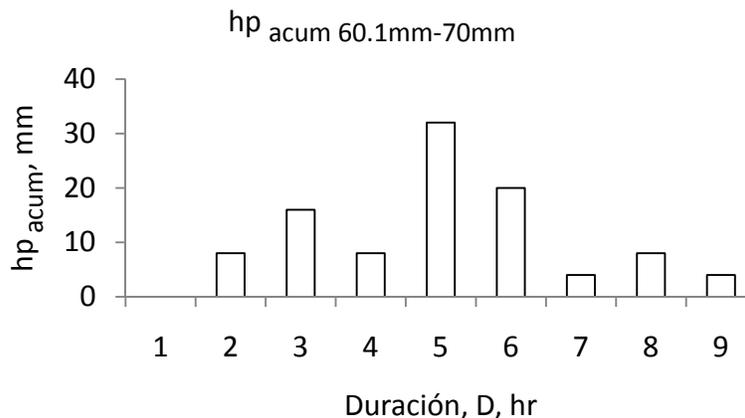


Figura 6.2 Frecuencia de duración por rango de lluvia acumulada entre 60.1 mm y 70 mm

7. CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo consistió en correr un modelo integrado de base física que requiere de varios datos de entrada, entre ellos, el uso de valores de lluvia a intervalos menores de 24 horas y de hidrogramas de escurrimientos provocados por tormentas específicas. Su aplicación en México implica la ausencia o escasez de datos, y cuando existen, contar con una escala inadecuada de éstos. Para sortear dicha situación se propuso una metodología para la generación de hietogramas y sus respectivas curvas masa para eventos de lluvia específicos, como datos de entrada al modelo, y también otras soluciones en el caso que de no contar con información de las clases de cobertura/uso del suelo-vegetación, como el uso del Clasificador Genérico propuesto por Palacios, 2006. Las soluciones fueron buscadas tratando de conseguir una simpleza en el procedimiento de tal manera que no fuera otro obstáculo en el uso del programa. Debe tomarse en cuenta que dada la cantidad y calidad de información con que dispone la cuenca del Río Huixtla, al aplicar KINEROS, se pueden esperar incertidumbres de aproximadamente 30% en los resultados de gasto pico de salida de la cuenca. Los principales problemas encontrados para correr el programa se debieron a la falta de datos de lluvia-escurrimiento con duraciones menores a 24 hr, la baja resolución del mapa de suelos FAO (1:5,000,000) y la ausencia de información digital de las clases cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca para las décadas analizadas. La falta de datos es un problema grave cotidiano en la solución de los problemas hidrológicos de las cuencas en México.

La calibración del método resultó ser importante ya que se encontró que existe una alta sensibilidad en el índice de saturación. Esto se puede constatar al revisar los resultados de la Tabla 7.1. En ella se comparan los porcentajes de variación entre los valores de gasto pico de salida de la cuenca, obtenidos utilizando los valores iniciales del índice de saturación y posteriormente al usar los valores calibrados de este parámetro. Se observa que cuatro tormentas no tuvieron variación, en las otras cuatro hubo variaciones importantes como en la tormenta de 1993 donde la diferencia de porcentajes de variación es abismal (1260.1 % para el valor inicial de S_i y 0.5 % para S_i calibrado). Esto significa que existe la posibilidad de que al no calibrar la

cuenca, se incurra en graves errores en la obtención del gasto pico de salida, al variar dicho valor (en ocasiones significativamente), al momento de calibrar el índice de saturación.

Se comprueba que el parámetro S_i es muy sensible en su calibración para obtener valores de gasto máximo y en el uso de tormentas tanto pequeñas como grandes. Como se comentó anteriormente, es probable que los índices de saturación calibrados que resultaron con varios decimales y que se observan en la misma Tabla 6.4, se deba a alguno de los siguientes factores o a la combinación de ellos: la escala utilizada por el mapa de suelos FAO que hacen predominante al tipo de suelo de Andosoles en la cuenca del Río Huixtla, la fórmula de infiltración que usa el modelo AWGA-KINEROS (Smith y Parlange) pues está pensada para cuencas áridas o semiáridas, y el tamaño de la cuenca.

Al aplicar las cuatro propuestas de métodos para construir los hietogramas y sus respectivas curvas masa a partir de lluvias en 24 horas, se encontró que los *Métodos de Chen-Domínguez* y *SCS Tipo II* se adecuaron correctamente a tormentas típicas, es decir, a aquellas donde el gasto registrado representa una respuesta coherente a la lluvia precipitada, además que los valores de lluvia y escurrimientos no son despreciables. Por otro lado, el método propuesto en el presente trabajo denominado *Método de la Curva Masa* mostró buenos resultados en aquellas tormentas con respuesta de escurrimiento escaso. Finalmente, el *Método de la Tormenta Paralela* representa una buena opción para generar hietogramas y su respectiva curva masa, partiendo de cualquier tipo de tormenta, ya sea de escurrimiento escaso o significativo. Este último es recomendado para la calibración del modelo pues es el que se apega más a la realidad de los datos de lluvia de la cuenca del Río Huixtla, al considerar la lluvia horaria de la estación cercana del Observatorio de Tapachula.

Tabla 7.1 Comparación entre valores de gasto pico de salida obtenidos con el índice de saturación inicial y el calibrado

Núm.	Fecha tormenta	hp,mm	Q _p , m ³ /s (medido)	Índice de saturación INICIAL, S _i	Q _p , m ³ /s (KINEROS)	% variación	Índice de saturación CALIBRADO, S _i	Q _p , m ³ /s (calculado)	% variación
1	14-Sep-81	115.9	266.5	0.9	186.1	-30.15	0.9299	195.6	-26.6
2	24-Sep-82	69.2	332.9	0.95	663.4	99.3	0.86	336.7	1.2
3	27-Sep-87	44	84.2	0.55	15.2	-82.0	0.919999	73.8	-12.4
4	02-Sep-88	135.1	417.8	0.99	787.0	88.4	0.929999	375.9	-10.0
5	12-Sep-90	42.2	172.1	0.95	135.9	-21.0	0.95	135.9	-21.0
6	09-Oct-91	24.9	23.093	0.95	18.9	-18.3	0.95	18.9	-18.3
7	30-Jun-93	57.8	31.276	0.95	425.5	1260.5	0.58	31.448	0.5
8	27-Sep-96	19.1	51.1	0.95	18.5	-55.3	0.95	18.5	-55.3

Es importante señalar que todos los métodos propuestos, a excepción del *Método de la Tormenta Paralela*, fueron creados para la obtención de tormentas de diseño. Si hubiera que elegir otro método por la falta de datos de lluvia en cuencas vecinas a la cuenca de estudio, el método de Chen-Domínguez pudiera funcionar adecuadamente para la Costa de Chiapas, siempre y cuando no se tengan tormentas con poco escurrimiento. Dicho método ha sido calibrado en el país (DGCOH, 1982, Franco, 1998, Baeza, 2007) para la obtención de lluvias de diseño. Se enfatiza que no es lo mismo una lluvia de diseño que una lluvia para calibrar un modelo, pues la primera permite diseñar obras hidráulicas y la segunda permite inferir la curva masa de un hietograma para una tormenta específica destinada a ser calibrada para revisar la efectividad de los datos de salida (gasto pico), obtenidos por un método hidrológico que en este caso es KINEROS. Se eligió probar la creación de los hietogramas y curva masa correspondiente de una tormenta específica usando dichos métodos, por la forma “S” estilizada como se crea la curva masa, que indica una lluvia concentrada en un determinado tiempo capaz de producir un escurrimiento no despreciable en la cuenca.

Por otro lado, el *Método de la Curva Masa*, a pesar de que se propone a partir de información de lluvia horaria en Tapachula, no cubrió completamente con las expectativas deseadas en ser el método elegido para obtener los hietogramas y curvas masa correspondientes de las tormentas elegidas para ser calibradas. Es probable que se deba a que la estación se encuentra a una altitud menor que la de Huixtla, provocando que la lluvia sea más intensa en la zona cercana a las montañas donde se ubica la población de Huixtla que en la zona plana cercana a la Costa donde se ubica Tapachula. En menor medida se puede atribuir también al tamaño de la muestra de análisis (23 años) y a la incertidumbre de los registros de datos.

La importancia de la duración y la forma de la tormenta es vital para una adecuada respuesta de la cuenca. Esto se pudo constatar al momento de buscar las tormentas equivalentes en el registro de Tapachula, pero también se comprobó cuando se crearon los hietogramas y sus correspondientes curvas masa de las tormentas a calibrar usando los diferentes métodos para su creación. Por ejemplo, para el caso de la tormenta de 1981 y otras similares como la de 1988, el *Método de la Curva Masa* genera un hietograma con características de lluvia muy concentrada comparado con el *Método Chen-Domínguez o SCS Tipo II*, donde la lluvia se distribuye más en

el tiempo. Esto se refleja en el gasto de salida de la cuenca obtenido con KINEROS, ya que en el primer caso se dispara dicho valor de gasto pico, y para los otros dos métodos mencionados, el valor del gasto pico resulta medido.

Respecto al supuesto planteado en el presente trabajo, que se refiere a que los eventos de tormenta que caen dentro de un rango del 30 % de la línea de ajuste de correlación entre la precipitación y el gasto de 24 horas, corresponden a eventos máximos de tormenta, se encontró en el subcapítulo relacionado con la elección de las tormentas a calibrar, que existe un 67 % de probabilidad de que dichas tormentas elegidas sean eventos máximos.

Las características obtenidas en la cuenca del Río Huixtla, tales como la obtención del índice de saturación, que por lo general se encontró por arriba de 0.90, confirma que se trabajó con eventos máximos; el hecho de que la lluvia se concentra en las primeras horas de la tormenta y que la duración total de las tormentas tiene una frecuencia entre 5 y 6 horas, así como un tiempo de concentración en la cuenca de 4.35 hr, ratifican que la cuenca es del tipo torrencial. Si se le agregan los cambios de uso del suelo en la cuenca, además de la vulnerabilidad de la población, es evidente el alto riesgo por inundaciones al que está expuesta la cuenca.

El modelo, a pesar de que ha sido usado en varios proyectos, sigue presentando aspectos finos que se relacionan con su uso original en cuencas experimentales y que dificultan su uso en proyectos donde no se cuenta con toda la información necesaria, como son hietogramas e hidrogramas de tormentas horarias o bien mapas digitales de alta resolución. Por otro lado, es necesario calibrar el modelo en cuencas instrumentadas de clima tropical-húmedo, para tener elementos certeros de juicio sobre su funcionamiento, ya que no hay que olvidar que el modelo KINEROS fue concebido para cuencas áridas o semiáridas y que las calibraciones y validaciones han sido realizadas en cuencas con este tipo de clima. Igualmente se recomienda trabajar en cuencas menores o iguales a los 100 km², para mantener todas las condiciones que marca el modelo con el fin de probar su efectividad en ambientes controlados.

Por otro lado, se considera de suma importancia elegir los valores adecuados para cada parámetro de la tabla de consulta *nalc_lut*, pues su elección correcta incidirá en los resultados del

programa. La modificación de dicha tabla requiere en parte de experiencia en la asignación de valores de los parámetros, dado que, en algunos casos, no hay muchas tablas que asignen valores para diferentes clases de cobertura vegetal (como intercepción).

Se recomienda usar las técnicas comunes para obtener los usos de suelo y cobertura vegetal. El clasificador genérico es útil cuando no hay dichas técnicas, sin embargo, no se recomienda para hacer análisis del cambio de uso del suelo. Debe tomarse en cuenta que los resultados del clasificador genérico da valores cualitativos más que cuantitativos, para el caso que nos ocupa.

Uno de los puntos medulares de mi trabajo es el haber tenido que generar información para introducir las variables de entrada al modelo. Este es un caso más de los muchos que se dan en México al trabajar en estudios hidrológicos. México cuenta con poca información climatológica, hidrográfica e hidrométrica a nivel nacional. La situación es alarmante debido a que inclusive han disminuido en número de estaciones con el paso del tiempo. Con eso no dejo de valorar la existencia de las estaciones automáticas que se han instalado relativamente hace poco tiempo en el territorio nacional, así como de radares, de los cuales se cuenta con dos o tres que están funcionando correctamente. Además, las estaciones físicamente carecen de mantenimiento y pueden ser sujetas a actos de pillaje.

Una recomendación al respecto de esta problemática, encaminada a las autoridades locales, y estatales, sería tomar en serio la posibilidad de incrementar el número de estaciones de medición climatológica y de escurrimiento por Estado de la República, apoyar las labores de mantenimiento de las estaciones, así como buscar mecanismos que ayuden al procesamiento de los datos obtenidos de dichas estaciones, que incidan en la calidad de información. Esto se puede realizar en conjunción con el Servicio Meteorológico Nacional, al llegar a acuerdos que beneficien a ambas partes y en donde se involucre a instituciones académicas como las Universidades Estatales, por ejemplo.

Una recomendación a las autoridades de Federales sería aumentar el presupuesto al Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA, para que tenga los incentivos económicos para mejorar el procesamiento de la información, dar mantenimiento a las estaciones que están a su

cargo, y preferentemente, aumentar el número de estaciones con que cuenta. En cuanto al procesamiento de información, hay mucha que se queda sin procesar debido a la falta del recurso humano para hacerlo, como sería la construcción de hidrogramas, que en el pasado, se podían obtener. Considero que la situación actual del Servicio Meteorológico es decadente puesto que cada vez se han reducido las funciones para las cuales fue creado. Con respecto al potencial humano también se ha visto un retroceso debido a que existe personal que ha trabajado en la institución por más de 20 o 30 años, sin que haya una capacitación de gente joven que ocupe eventualmente puestos estratégicos en la toma de decisiones.

Esta situación refleja que los gobiernos a nivel Federal y Estatal, no le han dado la suficiente importancia a la generación de información climatológica e hidrométrica en el país, cuando ésta es primordial para solucionar problemas en cuencas, relativos a la calidad del agua, inundaciones, eventos meteorológicos extremos, movimientos en masa, sedimentos, erosión, contaminación de suelos y agua, disponibilidad del agua, productividad de los suelos, crecimiento de los cultivos, etc. Una razón de peso para esta petición es la necesidad de contar con la mejor calidad y cantidad de información climatológica, para encarar con la menor incertidumbre posible, la ocurrencia del Cambio Climático en México.

Por último, pero no menos importante, se recomienda a los tomadores de decisiones que ante la necesidad de resolver problemas con carácter hidrológico de diversa índole en una cuenca, es primordial elegir adecuadamente el Modelo Hidrológico que se vaya a utilizar, contando con antelación con información de las características hidrológicas y edafológicas de la cuenca de interés, el tipo de clima y el tamaño de ésta. Ello proporcionará el grado de confiabilidad en los resultados obtenidos con el modelo elegido.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abad C., N. G., 2006. *Modelación hidrológica de las cuencas el Chuveje y Arroyo Real como herramienta en la implementación de pago por servicios ecológicos en la reserva de la biosfera Sierra Gorda, Queretaro, México*. Tesis de Maestría en Ciencias, Especialidad en Sistemas Ambientales. ITESM, Campus Monterrey, División de Ingeniería y Arquitectura. Programa de graduados en Ingeniería. Monterrey, N.L. Diciembre.
- Al-Qurashi, A. et al, 2008. *Application of the Kineros2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman*. Journal of Hydrology (2008) 355, 91-105, Elsevier B.V.
- Arbuet M., M. A., 2009. *Efectos hidrológicos del cambio de uso del suelo en el Litoral Argentino. Estudio de caso: cuenca de A° Feliciano (Provincia de Entre Ríos)*. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería y Ciencia Hídricas, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina. Diciembre.
- Arellano M., J. L., 2009. *Vulnerabilidad y gestión de riesgos en las cuencas de la Sierra Madre de Chiapas, México*. Seminario Internacional sobre desastres por inundación. Informe Final. Contract no. 3117.9. Querétaro. 21-23 de Octubre 2009. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería. Centro de Investigaciones del Agua, CIAQ. México.
- Arganis J., M. L. et al, 2007. *Ponderación del coeficiente n de Manning de las márgenes un río*. Revista TLALOC No. 39, Febrero-Octubre 2007, pág. 4 -8, Asociación Mexicana de Hidráulica (AMH).
- Arnold, J.G., Williams, J.R., Srinivasan, R., King, K.W. and Griggs, R.H.: 1994, SWAT: *Soil Water Assessment Tool*, U. S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX, USA.
- Baeza R., C., 2007. *Estimación regional de factores de conectividad para el cálculo de relaciones intensidad-duración-frecuencia*. Tesis de maestría en Ingeniería (Hidráulica). División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. Octubre.
- Barrios, A., 1997. *Introducción a la planificación y formulación de proyectos de manejo de cuencas hidrográficas*. 2^{do} Borrador. Material para utilizarse en el curso regional sobre *Planificación ambiental con énfasis en la Gestión de Cuencas Hidrográficas, con apoyo de sistemas de información geográfica*, Mérida, del 03 al 28 de noviembre de 1997. Centro de Estudios Forestales de Postgrado, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Octubre. <http://fi.uaemex.mx/luislalo/girh/IntroPlanManejo.pdf>
- Batjes, N. H., 1997. *A world dataset of derived soil properties by FAO-UNESCO soil unit for global modelling*. Soil Use and Management (1997) 13, 9-16.

- Bell, F.C. 1969. *Generalized Rainfall-Duration-Frequency Relationships*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 95, No. HY1, pp. 311-27. January 1969.
- Bergsma E., et al, 1996. *Terminology for Soil Erosion and Conservation*. International Society of Soil Science. http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i24693_001.pdf
- Bisri, M., Othman, F., Sholichin, M., 2008. *Determination Of Runoff Value Using Kineros Model (Case Study In Sumpil Catchment, Indonesia)*. ICCBT- D - (15) - pp157-168
- Bitrán B., D., 2001. *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99*, Serie: Impacto Socioeconómico de los desastres naturales en México No. 1, Coordinación de Investigación, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Secretaría de Gobernación, México. Octubre.
- Bosley II, E. K., 2008. *Hydrologic Evaluation of Low Impact Development Using a Continuous, Spatially-Distributed Model*. Master of Science in Civil Engineering. Blacksburg, Virginia, U.S.A., July 11.
- Brooks K.N., Ffolliott P. F., Gregersen H. M., DeBano L. F., 2003. *Hydrology and the management of watersheds*. Iowa State University Press. Tercera edición.
- Campos-Aranda, D.F., 2010. *Intensidades máximas de lluvia para diseño hidrológico urbano en la República Mexicana*. Revista Ingeniería, investigación y tecnología. Versión impresa ISSN 1405-7743. Ing. invest. y tecnol. v.11 n.2 México abr./jun. 2010, Facultad de Ingeniería, UNAM. México D.F. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-77432010000200005&script=sci_arttext
- Campos-Aranda, D.F., 1998. *Procesos del ciclo hidrológico*. Tercera Reimpresión, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, San Luis Potosí, S.L.P.
- Canfield, H. E., Goodrich, D. C., 2006. *The impact of parameter lumping and geometric simplification in modelling runoff and erosion in the shrublands of southeast Arizona*. Hydrol. Process. 20, 17–35.
- CENAPRED, 2006. *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2005*. Serie: Impacto Socioeconómico de los desastres naturales en México No. 7, Coordinación de Investigación, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Secretaría de Gobernación, México. Agosto.
- Chen C. L., 1983. *Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formulas*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. Vol. 109, No. 12, pp. 1603-1621. December 1983. U.S.A.

- Chow V. T., Maidment D. R., Mays L. W., 1994. *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill Interamericana, S.A., Colombia.
- CONAGUA, 2007. *Plan Nacional Hídrico 2007-2014*.
- CONAGUA, 2002. *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Arriaga -Pijijiapan, estado de Chiapas*. Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subdirección General Técnica. México D.F. 30 de abril. http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DR_0711.pdf
- Cordero G., H., 2008. *Uso del modelo SWAT y la técnica de álgebra de mapas para estimar la erosión en la cuenca del río Huixtla, Chiapas*. Tesis de licenciatura en Ingeniería en Irrigación. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. Mayo.
- Cruz S., D., 2004. *Simulación del flujo permanente variado en el río Huixtla con el paquete de cómputo HEC-RAS*. Tesis de licenciatura en Ingeniería en Irrigación. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. Octubre.
- DGCOH, 1982. *Manual de Hidráulica Urbana. Tomo I. Teoría General*. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Departamento del Distrito Federal. Secretaría de Obras y Servicios. México.
- Dickinson, W. T, Holan, M. E. y Smith G. L., 1967. *An Experimental Rainfall-Runoff Facility*. Hydrology Paper No. 25, Colorado State University, Fort Collins, CO., 81 pp.
- Domínguez M., R., Franco D., C., 2002. *Análisis regional para la obtención de precipitaciones de diseño asociadas a duraciones menores que 2 h*. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba.
- Dourojeanni, A., 1994. *Políticas públicas para el desarrollo sustentable: La Gestión Integrada de Cuencas*. INRENA-CEPAL. II Congreso Latinoamericano de Manejo de Cuencas Hidrográficas. Mérida . Venezuela.
- Dunne T., Leopold L. B., 1978. *Water in environmental planning*. W.H. Freeman and Company, Nueva York.
- Echeverri V., C. A., 2007. *Estudio de las crecientes en la cuencas de la costa del estado de Chiapas*. Tesis de maestría en Ingeniería (Hidráulica). División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. Septiembre.

- Ecosur 2008. *Zonas afectadas por el huracán Stan en las Regiones Istmo-Costa, Sierra Soconusco. (Investigación para su Ordenamiento)*. El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del Estado de Chiapas (CONACYT-Cocytech), Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), Comisión de Areas Naturales Protegidas (CONANP), Instituto de Desarrollo Sustentable en Mesoamérica A.C. (IDESMAC). Proyecto y publicación financiados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología del estado de Chiapas. CONACYT-Cocytech. FOMIX CHIS-2005-C05-22099. México. ISBN 978-970-9712-62-9.
- Espíritu T., G., 2006. *Detección de zonas de inundación por factores geomorfológicos e hidrológicos, en la cuenca de Coatán. Una propuesta metodológica*. Congreso Nacional y Reunión Mesoamericana de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, Organizado por: la Universidad Autónoma de Querétaro, el Instituto Nacional de Ecología y el Fideicomiso de Riesgo Compartido. 19-21 Septiembre, Querétaro, México. http://www.ine.gob.mx/dgioece/cuencas/descargas/cong_nal_06/tema_05/10_gloriaespiritu3.pdf
- Franco D., C. G., 1998. *Análisis regional de lluvias convectivas. Aplicación al Valle de México*. Tesis de maestría en Ingeniería (Hidráulica). División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
- Galván-Fernández A. y A. Z. Márquez-García, 2006. *Descripción biofísica de la cuenca del Río Coapa, Chiapas*. Hidrobiológica 16 (2): 107-120.
- García R., A., 2006. *Hietogramas de diseño en zonas urbanas*. Proyecto terminal. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica. Ingeniería Hidrológica. Universidad Autónoma Metropolitana. Noviembre 2006.
- García, V. E. 1988. *Modificación al sistema de clasificación climática de koppen*. Instituto de Geografía. Universidad Autónoma de México. 96 p. México.
- Golder Associates Inc., 2006. *Ruby River watershed. Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA). Model sediment yield assessment*. Appendix H. Submitted to Watershed Consulting LLC Whitefish, Montana and Montana Department of Environmental Quality Helena, Montana, September 20, 2004 , 023-1233.500. Published on May, 2006.
- González G., E., 2005. *Análisis hidrológico de la costa de Chiapas* . Tesis de maestría en Ingeniería (Hidráulica). División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. Febrero.
- Goodrich, D.C., H. E. Canfield, I.S. Burns, D.J. Semmens, S.N. Miller, M. Hernandez, L.R. Levick, D.P. Guertin, and W.G. Kepner. 2005. *Rapid Post-Fire Hydrologic Watershed Assessment using the AGWA GISbased Hydrologic Modeling Tool*. Proc. ASCE Watershed

Manage. Conf., July 19-22, Williamsburg. <http://www.epa.gov/esd/land-sci/agwa/pdf/pubs/Goodrich-ASCE-05-AGWA.pdf>

Goodrich, D.C. and W.G. Kepner. 2000. *Landscape Indicator Interface with Hydrologic Models* (62 pp). EPA/600/R-00/042. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D.C. <http://www.epa.gov/esd/land-sci/agwa/pdf/177leb00.pdf>

Goodrich, D. C., 1991. *Basin scale and runoff model complexity*. Univ. of Arizona. Dept. of Hydrology and Water Resource. Technical Report No. HWR 91-010, 361 p.

Goodrich, D. C., 1990. *Geometric simplification of a distributed rainfall-runoff model over a range of basin scales*. PhD Dissertation, Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, Tucson, Arizona, 361 pp.

Gotti, N. L., 1996. *Testing a physically-based distributed model (KINEROS): Predicting runoff and erosion from a semi-arid hillslope in the Southwestern United States*. Partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil and Environmental Engineering. Massachusetts Institute of Technology. U.S.A. May <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/39382/35265510.pdf;jsessionid=51767972DE8A07B4EAA9132CA5E9DD3B?sequence=1>

Gregersen H. M., Ffolliott P.F., Brooks K.N., 2007. *Integrated Watershed Management. Connecting people to their land and water*. CAB International. Reino Unido.

Guichard R., D., Méndez A., B., García B., A. N., Rodríguez V., A., 2008. *Variabilidad espacio temporal de la lluvia en Chiapas*. Resumen. XX Congreso Nacional de Hidráulica. Infraestructura Hidráulica, sustento del desarrollo de México. Toluca, 15 al 18 de octubre.

Hantush, M. M. and Kalin, L., 2005. *Uncertainty and sensitivity analysis of runoff and sediment yield in a small agricultural watershed with KINEROS2 / Analyse d'incertitude et de sensibilité des simulations d'écoulement et de transport solide de KINEROS2 dans un petit bassin versant agricole*, Hydrological Sciences Journal, 50: 6, 1151 — 1171. <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.2005.50.6.1151>

Hantush, M.M., Kalin L., 2003. *Modeling Uncertainty of Runoff and Sediment Yield Using a Distributed Hydrologic Model*. 1st Interagency Conference on Research in the Watersheds (ICRW), Benson, AZ, October 27-30, 2003, 325-331. <http://www.tucson.ars.ag.gov/icrw/Proceedings/Hantush.pdf>

Hernández, M., Miller, S., Semmens, D., Goodrich, D.C., Miller, W.P., and Kepner, W.G., 2002, *Quality Assurance and Quality Control in the Development and Application of the Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) Tool*. Environmental Protection Agency (EPA), EPA/600/R-02/046, ARS/137460, April 2002. http://www.epa.gov/esd/land-sci/agwa/pdf/agwa_qaqc.pdf

- Hernández, M., Miller, S. N., Goodrich, D. C., Goff, B. F., Kepner W. G., Edmonds, C. M., Jones, K. B., 2000. *Modeling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watershed*. Environmental Monitoring and Assessment 64: 285–298. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. <http://www.epa.gov/esd/land-sci/pdf/modellingrunoff.pdf>
- Hernández, M. and D. C. Goodrich, 1998. *Landscape indicator interface with hydrologic and ecological models*, Report No. 2 (October) prepared as part of EPA/IAG Project No. DW12937916-01-0, USDA-ARS, Southwest Watershed Research Center, Tucson, AZ.
- Herrero L., J., Rodríguez R., M. I., Avilés B., A., 2004. *Modelos integrales de cuencas hidrográficas y prognosis de escenarios de gestión. SWAT aplicado a la cuenca del Guadalfeo*. Grupo de Ríos y Embalses, CEAMA, Universidad de Granada. IV Congreso Ibérico sobre gestión y planificación del agua, Tortosa. Diciembre. [MODELOS INTEGRALES DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y ...](#)
- Horton, R.E. 1919. *Rainfall interception*. Monthly Weather Review 47:603-623.
- Huber, W. C., Cunningham, B. A., and Cavender, K. A., 1986. *Use of continuous SWMM for selection of historic rainfall design events in Tallahassee*. Proceedings of Stormwater and Water Quality Model Users Group meeting, March 24-25, 1986, Orlando, FL. Edited by Thomas O. Barnwell, Jr., Wayne C. Huber. Athens, GA : Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 1986, pp. 303-329.
- INEGI, 2011. Página oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=07>
- IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma. http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/images/resources/pdf_documents/wsrr84s.pdf
- Jiménez V., G., 2007. *Cambio de uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos de la cuenca del río Huixtla, Chiapas*. Tesis de licenciatura en Ingeniería en Irrigación. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. Diciembre.
- Kalin L., Hantush M. M., 2006. *Comparative assessment of two distributed watershed models with application to a small watershed*. Hydrological Processes. Volume 20, Issue 11, 2285–2307, John Wiley & Sons, Ltd, July 2006.
- Kalin L., Hantush M. M., 2003. *Evaluation of sediment transport models and comparative application of two watershed models*. EPA Report No. EPA/600/R-03/139, U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)- National Risk Management Research Laboratory (NRMRL), Cincinnati, OH, 81 pg. September 2003. <http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/Pubs/600r03139/600r03139.pdf>

- Kalin, L., Govindaraju, R. S., Hantush, M. M., 2003b. *Effect of geomorphologic resolution on runoff hydrograph and sedimentograph*. J. Hydrol. 276, 89–111.
- Kepner, W.G., D.J. Semmens, S.D. Basset, D.A. Mouat, and D.C. Goodrich. 2004. *Scenario analysis for the San Pedro River, analyzing hydrological consequences for a future environment*. Environmental Modeling and Assessment 94:115–127. http://www.epa.gov/esd/land-sci/pdf/scenario_spedro.pdf
- Knisel, Walter G., editor, 1980. *CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*. U.S. Department of Agriculture, Conservation Research Report No. 26, 640 pp., illus.
- Lane, L. J., Hernandez, M., Nichols, M., 1997. *Processes controlling sediment yield from watersheds as functions of spatial scale*. Environmental Modelling & Software, Vol. 12, No. 4, pp. 355- 369, 1997. Elsevier Science Ltd. 1998, Great Britain. <http://ddr.nal.usda.gov/bitstream/10113/6272/1/IND43973629.pdf>
- Levick, L.R., 2005. Script: ws.fao.weighting.KINEROS. USDA-ARS. <http://www.epa.gov/nerlesd1/land-sci/agwa/arcview/contents.htm>
- Levick, L.R., Semmens, D.J., Guertin, D.P., Burns, I.S., Scott, S.N., Unkrich, C.L., and Goodrich, D.C., 2004. *Adding Global Soils Data to the Automated Geospatial Watershed Assessment Tool (AGWA)*. Second International Symposium on Transboundary Waters Management, Tucson, AZ. 2004. November 16-19. CD Proceedings. 8p. <http://www.epa.gov/esd/land-sci/agwa/pdf/pubs/global-soil.pdf>
- Marques da Silva, R., Santos, C. A. G., Pereira e Silva, L., da Costa Silva, F., C. B., sin/año. *Soil loss prediction in Guaraira river experimental basin, Paraíba, Brazil base don two erosio simulation models*. www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/download/66/265
- Mendoza P., R. L., 2008. *Valoración del potencial de servicios ambientales hidrológicos en vegetaciones contrastantes de la Sierra Gorda de Querétaro*. Tesis de Maestría en Gestión Integrada de Cuencas, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro. Mayo. http://www.uaq.mx/FCN/Posgrados/MGIC/UAQ_MGIC/alumnos_files/M%20en%20C%20RENE%20%20LEONARDO%20MENDOZA%20PEDRAZA.pdf
- Mendoza G., M., 2001. *Factores de regionalización de lluvias máximas en la República Mexicana*. Tesis de maestría en Ingeniería (Hidráulica). División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F. Febrero.
- Michaud, J. D., Sorooshian, S., 1992. *Rainfall-runoff modeling of flashfloods in semiarid watersheds*. Univ. of Arizona. Dept. of Hydrology and Water Resources. Tech. Rep. No. HWR 92-030, 319 p.

- Miller, S. N., Guertin, D. P., and Goodrich, D. C., 2007. *Hydrologic modeling uncertainty resulting from land cover misclassification*. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) Vol. 43, No. 4, pp. 1065 – 1075. August 2007.
- Miller, S.N., Semmens, D.J., Miller, R.C., Hernandez, M., Miller, W.P., Goodrich, D.C., Kepner, W.G., Ebert, D., 2002, *GIS-based hydrologic modeling: The Automated Geospatial Watershed Assessment Tool*. Proc. 2nd Federal Interagency Conf. on Hydrologic, July 29-Aug. 1, Las Vegas, NV. <http://www.tucson.ars.ag.gov/unit/publications/PDFfiles/1442.pdf>; <http://www.tucson.ars.ag.gov/AGWA/docs/pubs/agwa-conference.pdf>
- Miller, S. N., et al, 2002. *Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis*. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) Vol. 38, No. 4 August 2002. <http://ddr.nal.usda.gov/bitstream/10113/34902/1/IND44269553.pdf>
- Moral, F. J. y Giráldez, J. V., 1995. *Influencia de la variabilidad del suelo en la hidrología superficial de una cuenca*. Ingeniería del Agua. Vol. 2 Núm. 1 (Abril 1995) p. 51.
- Morris, E.M., and D.A. Woolhiser. 1980. *Unsteady onedimensional flow over a plane: Partial equilibrium and recession hydrographs*. Water Resources Research 16(2): 355-360.
- Mundo M., M. D., 2007. *Mapas de riesgo y protección de cauces para evitar inundaciones en el río Coatán en Tapachula, Chiapas*. Tercer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Córdoba, República Argentina - 7, 8 y 9 de Noviembre. Instituto de Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina.
- Nearing, M.A., Jetten, V., Baffaut, C., Cerdan, O., Couturier, A., Hernandez, M., Le Bissonnais Y., Nichols, M.H., Nunes, J.P., Renschler, C.S., Souchère, V., K. van Oost, 2005. *Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover*. CATENA 61 (2005) 131 – 154, ELSEVIER. <http://ddr.nal.usda.gov/bitstream/10113/6784/1/IND43978149.pdf>
- Nikolova, M., Nedkov, S., Nikolov, V., Zuzdrov, I., Genev, M., Kotsev, T., Vatsseva, R., Krumova, Y., 2009. *Implementation of the “kineros” model for estimation of the flood prone territories in the Malki Iskar River Basin*. Information & security. An international journal, vol.24, 2009, 76-88.
- Norman L. M. et al, 2010. *Flood hazard awareness and hydrologic modelling at Ambos Nogales, Unites States-Mexico border*. Journal of Flood Risk Management, Volume 3, Issues 2, pages 151 – 165, June 2010.
- Olaya F., V., 2004. *Hidrología computacional y modelos digitales de terreno – teoría práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico*.

http://www.gabrielortiz.com/descargas/hidrologia_computacional_mdt_sig.pdf

- Osborn, H. B., Simanton, J. R., 1990. *Hydrologic modeling of a treated rangeland watershed*. J. Range Manage. 43, 474–481.
- Palacios-Sánchez L. A., et al 2006. *Clasificador genérico de objetos en imágenes ETM+*. Agrociencia 40: 613-626.
- Parlange, J. Y., Lisle, I, Braddock, R. D. & Smith, R. E., 1982. *The three-parameter infiltration equation*. Soil Sci. 133(6), 337–341.
- Pereyra-Díaz, D., Ochoa-Martínez, C. A. y Pérez-Sesma, J. A. A., 2005. *Ecuaciones de lluvia intensa generalizada para obtener precipitaciones máximas de corta duración*. GEOS, Vol. 25, No. 2.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek, and K.E. Saxton. 1982. *Estimation of soil water properties*. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers.
- Raymundo R., E., 2008. *Parámetros de transporte de atrazina en un Andosol y un Vertisol de México*. Tesis de Doctorado. Postgrado de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, 2008
- Renard, K. G., 1970. *The hydrology of semiarid rangeland watersheds*. USDA-ARS pub. 41162.
- Rojas, R., 2009. *Hidrología aplicada al Manejo de Cuencas*. Edición provisional. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes, Venezuela, 211 pp. Abril. <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/rojas.r/manualhid.pdf>
- Rosengaus M., M., Jiménez E., M., Vázquez C., M. T., 2002. *Atlas climatológico de ciclones tropicales en México*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Secretaría de Gobernación. Diciembre.
- RzedowskyJ., 2006. *Vegetación de México*. 1ra Edición digital. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), México, 504 pp. <http://www.mediafire.com/?omlnwmtv021>
- SARH, 1970. *Boletín Hidrológico de las Regiones Hidrológicas No.23, Costa de Chiapas y No. 29, Coatzacoalcos*. Tomo I. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos México.
- SARH, 1973. *Boletín Hidrológico de la Región Hidrológica No. 23, Costa de Chiapas y No. 29, Coatzacoalcos*. Tomo II. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos México.

- Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), 1976. *Documentación del Plan Nacional Hidráulico. 3 Red Hidrológica. Elementos Básicos*. Subsecretaría de Planeación. México.
- Semmens, D.J., D.C. Goodrich, C.L. Unkrich, R.E. Smith, D.A. Woolhiser, and S.N. Miller, 2008. *KINEROS2 and the AGWA modeling framework*. In: *Hydrological Modelling In Arid and Semi-Arid Areas*, Wheater, H., Sorooshian, S., and Sharma, K.D. (eds). Cambridge University Press, New York, 206pp.
http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/docs/pubs/GWADI_K2_chapter_final_epa_website.pdf
- Scott, S.N., I.S. Burns, D.J. Semmens, L. Levick, S.N. Miller, M. Hernandez, D.C. Goodrich, W.G. Kepner, 2006. *Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) – A GIS-Based Hydrologic Modeling Tool: Documentation and User Manual. Version 1.5*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-1446.
- Schiariti, Paul. *Basic Hydrology –Precipitation and Rainfall Distributions*. Mercer County Soil Conservation District. Mercer County Soil Conservation District. Nonpoint Source Office, n.d. Web. 4 Mar 2011. Consultado 12 diciembre 2011.
<http://njscdea.ncdea.org/PrecipDistributions.pdf>
- SCT, 2006. *Estudio hidrológico, sedimentológico y del comportamiento de los puentes en la zona costera de Chiapas. Informe final*. Trabajo elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Convenio: SCT-DGST-CEC-01-2006. Proyectos: 6339,6340, 6341, 6342. México D.F. Diciembre.
- Sheng Yuhong, 2004. *Modeling event-based coupled hydrologic and mass transport in small urban watersheds*. A Dissertation submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in The Department of Civil and Environmental Engineering. December, 2004. http://etd.lsu.edu/docs/available/etd-09012004-081308/unrestricted/Sheng_dis.pdf
- Smith, R. E., Quinton, J. N. 2000. *Chapter 13. Dynamics and scales in simulating erosion by water*. In: Schmidt, J. (Ed.), *Soil erosion. Application of Physically Based Models*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, pp. 283-294.
- Smith, R.E., Goodrich, D.C., Unkrich, C.L., 1999. *Simulation of selected events on the Catsop catchment by KINEROS2*, a report for the GCTE conference on catchment scale erosion models. *Catena* 37, 457– 475.
- Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., Unkrich, C.L., 1995. *KINEROS—a kinematic runoff and erosion model*. In: Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, pp. 697–732.

- Smith, R. E., Corradini, C., Melone, F., 1993. *Modeling infiltration for multistorm runoff events*. Water Resour. Res. 29(1), 133–144.
- Smith, R.E., and J.-Y. Parlange. 1978. *A parameter-efficient hydrologic infiltration model*. Water Resources Research 14(3) :533-538.
- Springall G., R., 1970. *Hidrología. Primera Parte*. Instituto de Ingeniería, UNAM. México. Abril.
- Suarez D., J., 2006. *Análisis de los problemas de erosión y deslaves. Carretera Huixtla-Motozintla, Chiapas*. Instituto de erosión y deslizamientos. Bucaramanga, Colombia. Febrero. http://ocw.uis.edu.co/educommons/ingenieria-civil/estabilidad-de-taludes/clase-7/Deslizamientos_en_la_via_Huixtla-Motozintla_en_Mexico.pdf
- Syed K. H., 1999. *The Impacts of Digital Elevation Model Data Types and Resolution on Hydrologic Modeling*. Ph.D. Dissertation., Department of Hydrology and Water Resources, Univ. of Arizona, Tucson, Arizona, 256 pp.
- Texas A & M University and U.S. Bureau of Reclamation, 2008. *Hydrologic Modeling Inventory. Model Description Form*. January 31, 2008.
- Texas A & M University and U.S. Bureau of Reclamation, 1999. *Hydrologic Modeling Inventory. Model Description Form*. June 18, 1999.
- Tholin, A. L., Keifer, C. J., 1959. *The Hydrology of Urban Runoff*. Journal of Sanitary Engineering Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. March 1959, pp 47-106
- USDA, 1986. *Urban hydrology for small watersheds*. Technical release 55. June.
- USDA, 1973. *A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds*. SC-TP-149. Soil Conservation Service. <http://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/TRsTPs/TP149.pdf>
- Woolhiser, D. A., R. E. Smith, and D.C. Goodrich, 1990. *KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 pp.
- Woolhiser, D. A., Holland, M. E., Smith G. L., Smith R. E., 1971. *Experimental investigation of converging overland flow*. Trans. ASAE 14(4), 684-687 pp.
- Zambrano A., S. M., 2010. *Ordenamiento Espacial de Prácticas de Conservación de Suelos en la microcuenca Alcocer-Sosnabar, San Miguel de Allende, Gto*. Tesis de Maestría en Gestión Integral de Cuencas. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro. Noviembre.

http://aeropuerto.uaq.mx/maestrias/Web%20Magik%20MOD/UAQ_MGIC/alumnos_files/generacion06/Silvia%20Maria%20Zambrano%20Aguilar/Silvia%20Maria%20Zambrano%20Aguilar.pdf

Zevenbergen, L. W., Peterson, M. R., 1988. *Evaluation and testing of storm event hydrologic models*. Proceedings ASCE Nat. Conf. on Hydraulic Engr., Colo. Springs, CO. Aug. 6-12, pp. 467-472.

Zheng D., Hunt, E. R., Jr., Running, S. W., 1996. *Comparison of available soil water capacity estimated from topography and soil series information*. Landscape Ecology vol. 11 no. 1 pp 3-14. <http://forestlandscape.wisc.edu/landscapeecology/articles/v11i01p003.pdf>

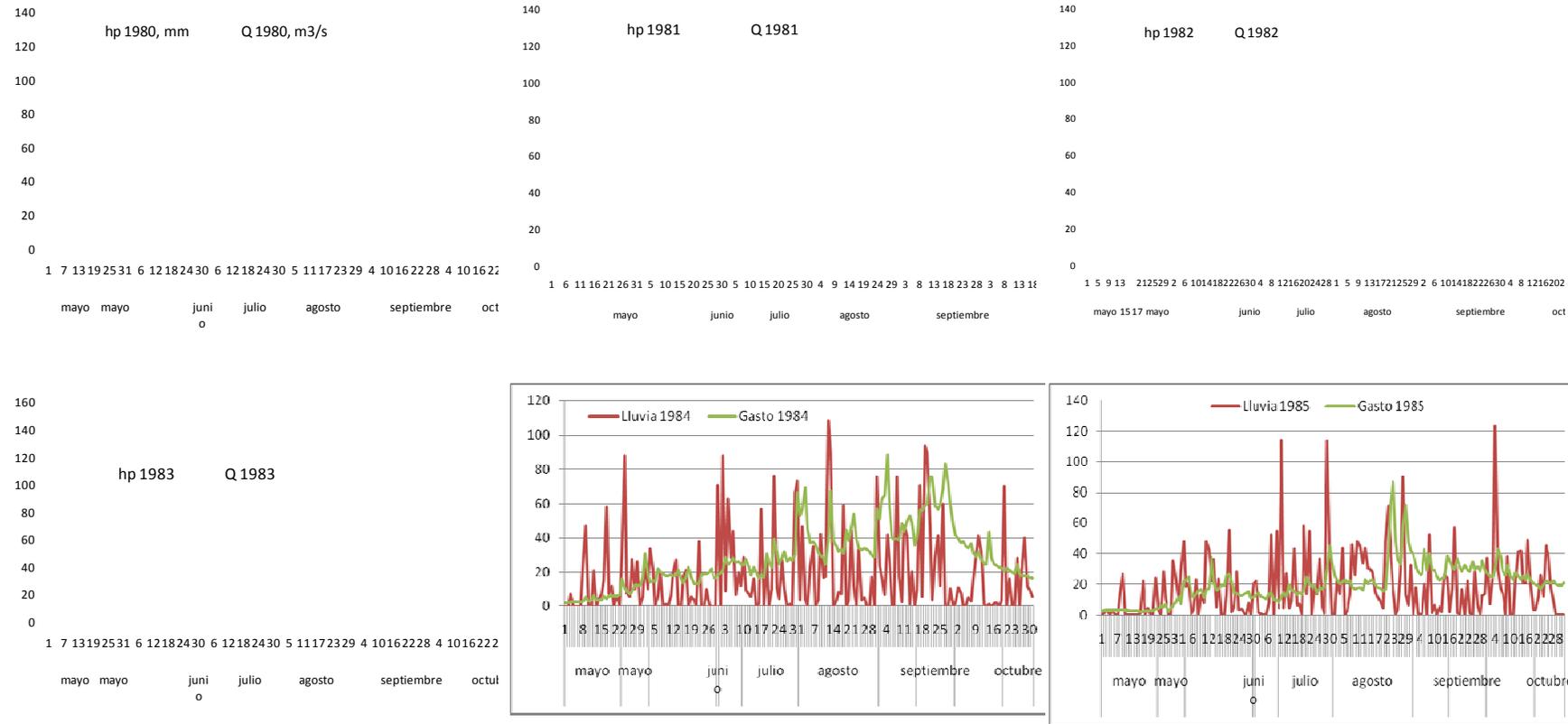
Ziegler, A. D., Giambelluca, T. W. & Sutherland, R. A. (2001) *Erosion prediction on unpaved mountain roads in northern Thailand: validation of dynamic erodibility modeling using KINEROS2*. Hydrol. Processes 15, 337–358.

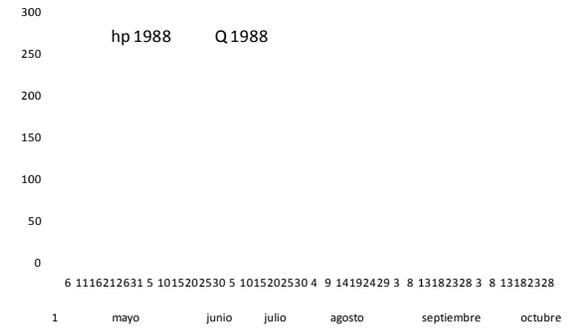
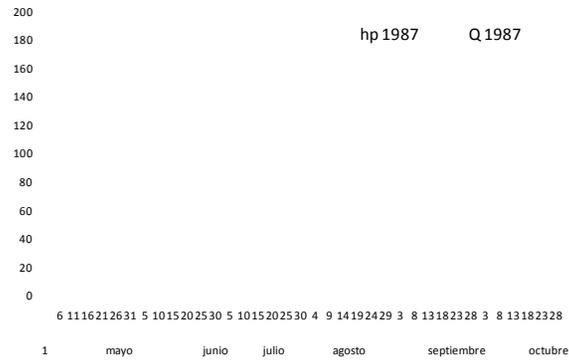
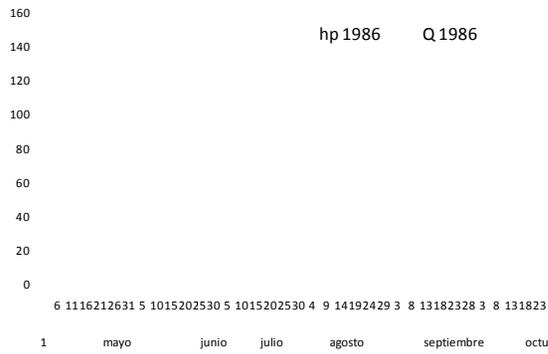
Ziegler, A. D., Giambelluca, T. W., 1997. *Simulation of runoff and erosion on mountainous roads in northern Thailand: a first look*. Human Impact on Erosion and Sedimentation (Proceedings of Rabat Symposium S6, April 1997). IAHS Publ. no. 245, 1997 21.

ANEXO A. TORMENTAS PRELIMINARES

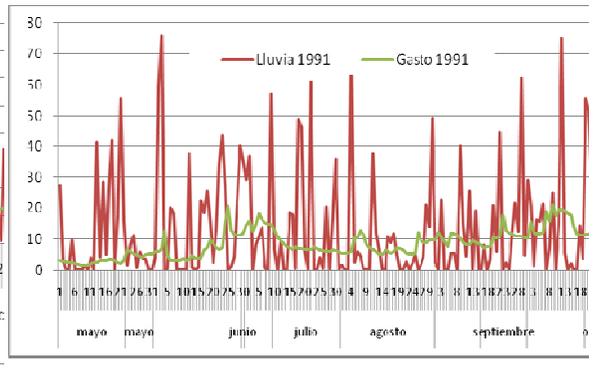
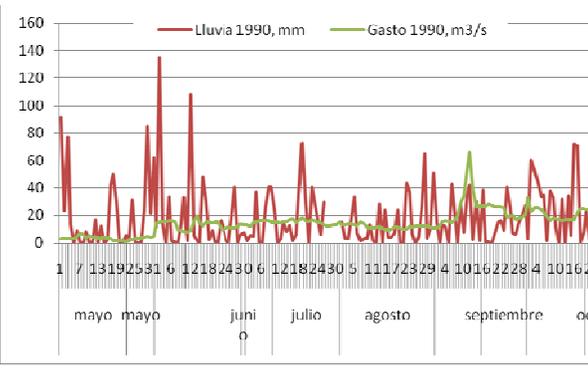
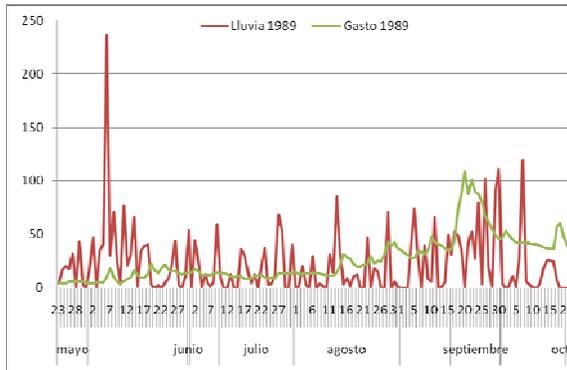
Figura A.1 Representación de la lluvia y escurrimiento entre mayo y octubre de cada año registrado en la estación climatológica e hidrométrica de Huixtla

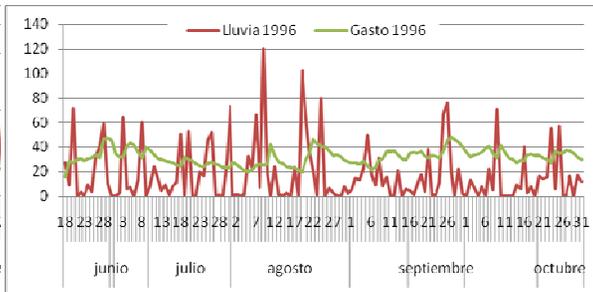
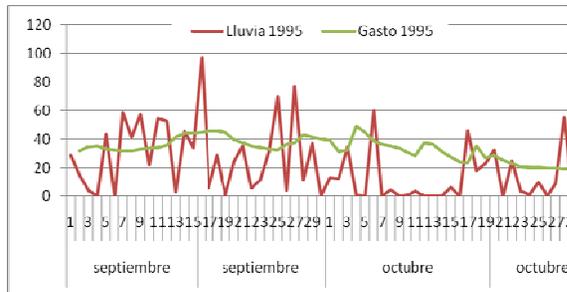
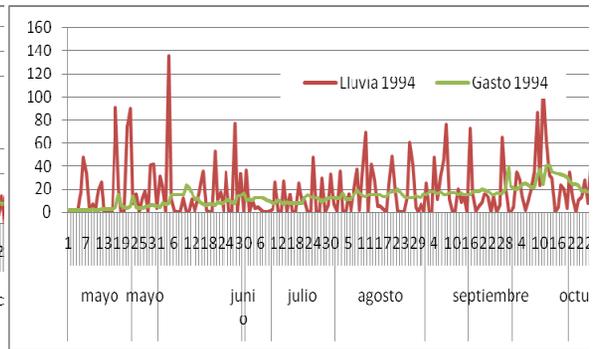
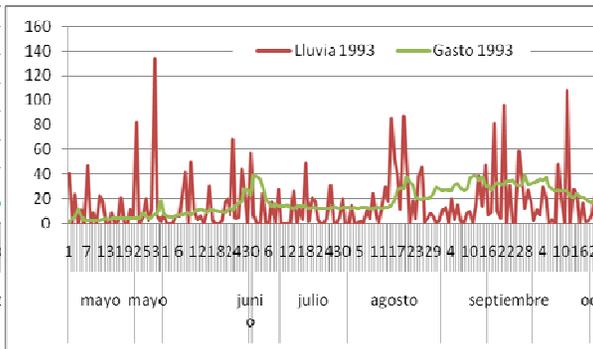
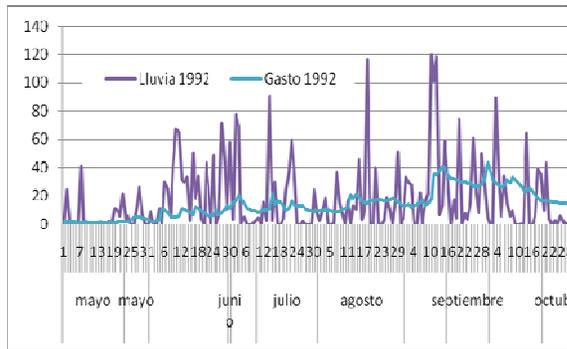
Década de los ochenta





Década de los noventa



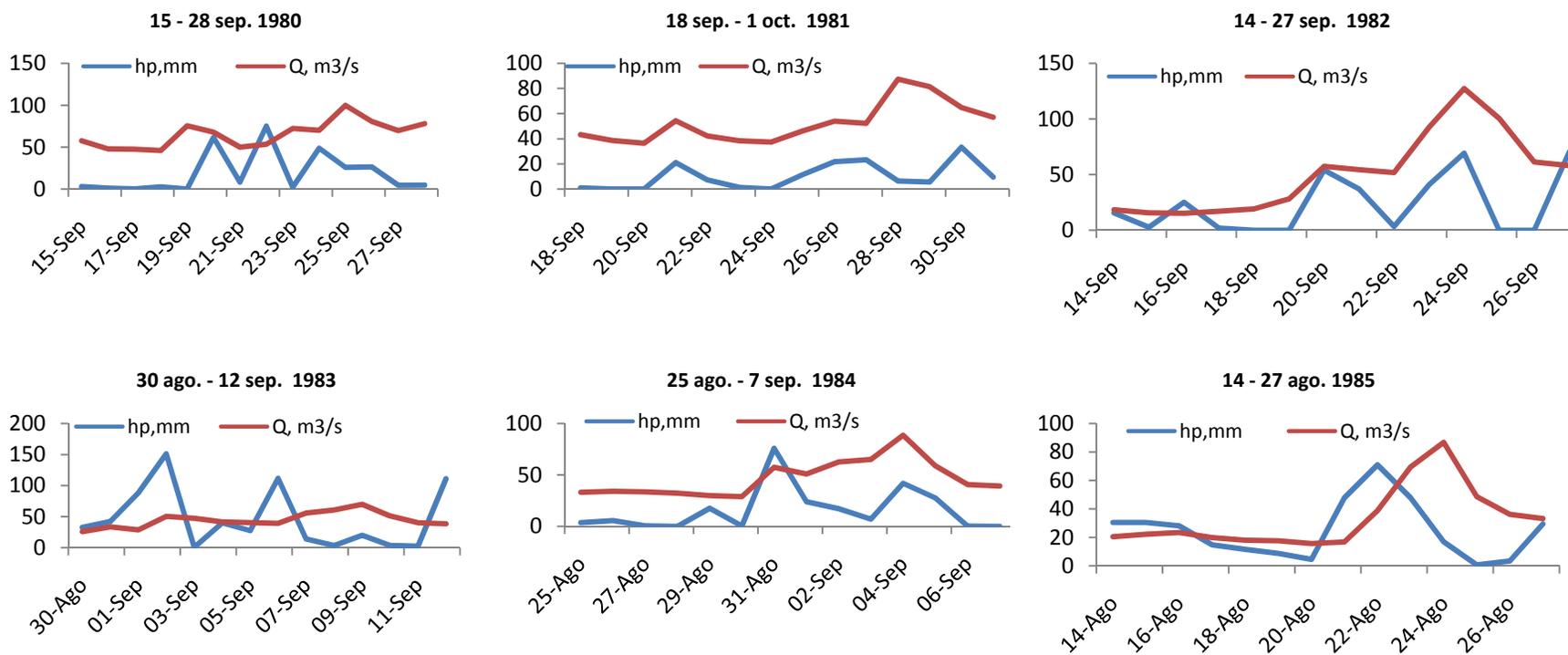


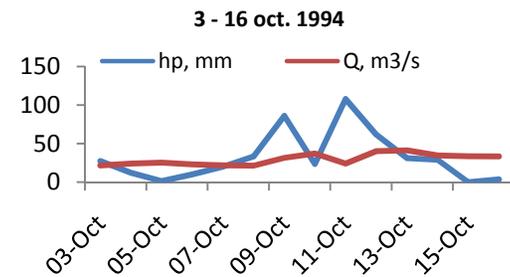
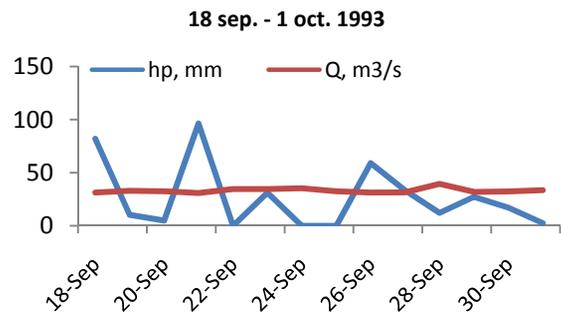
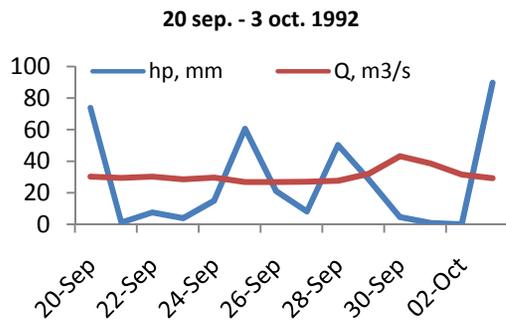
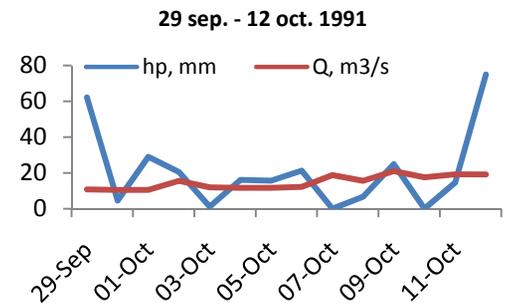
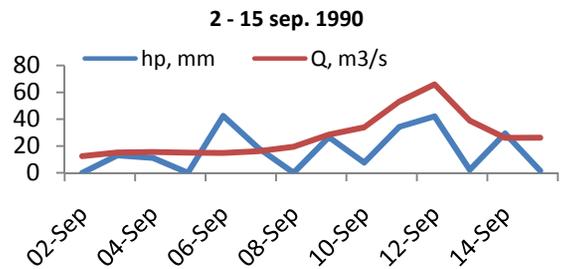
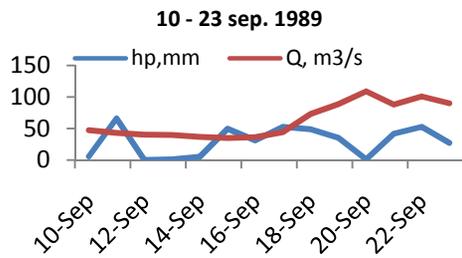
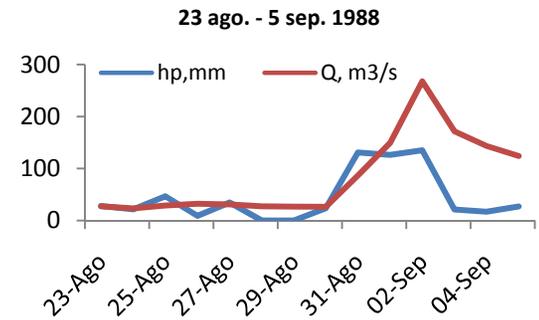
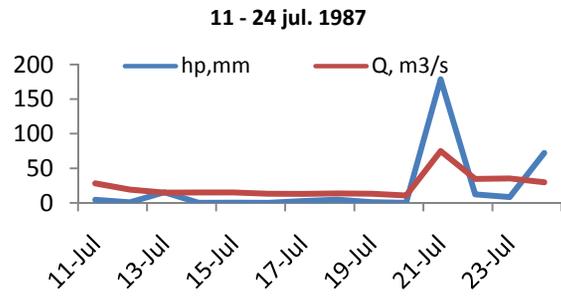
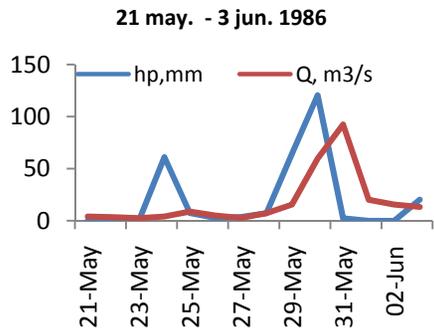
Nota: Los gastos fueron registrados a partir del mes de septiembre

Nota Los gastos fueron registrados a partir del 18 de junio

Figura A.2 Primer criterio de selección. Tormentas con el gasto máximo medio diario por año (17 en total).

El eje de las abscisas corresponde a la fecha de ocurrencia y el de las ordenadas a los valores de lluvia y gasto





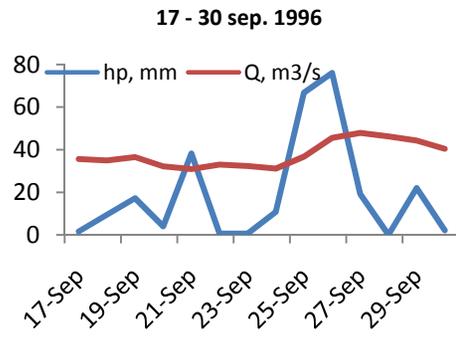
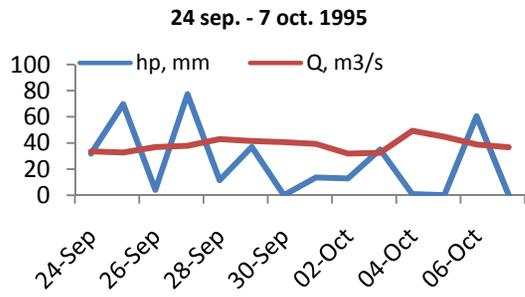
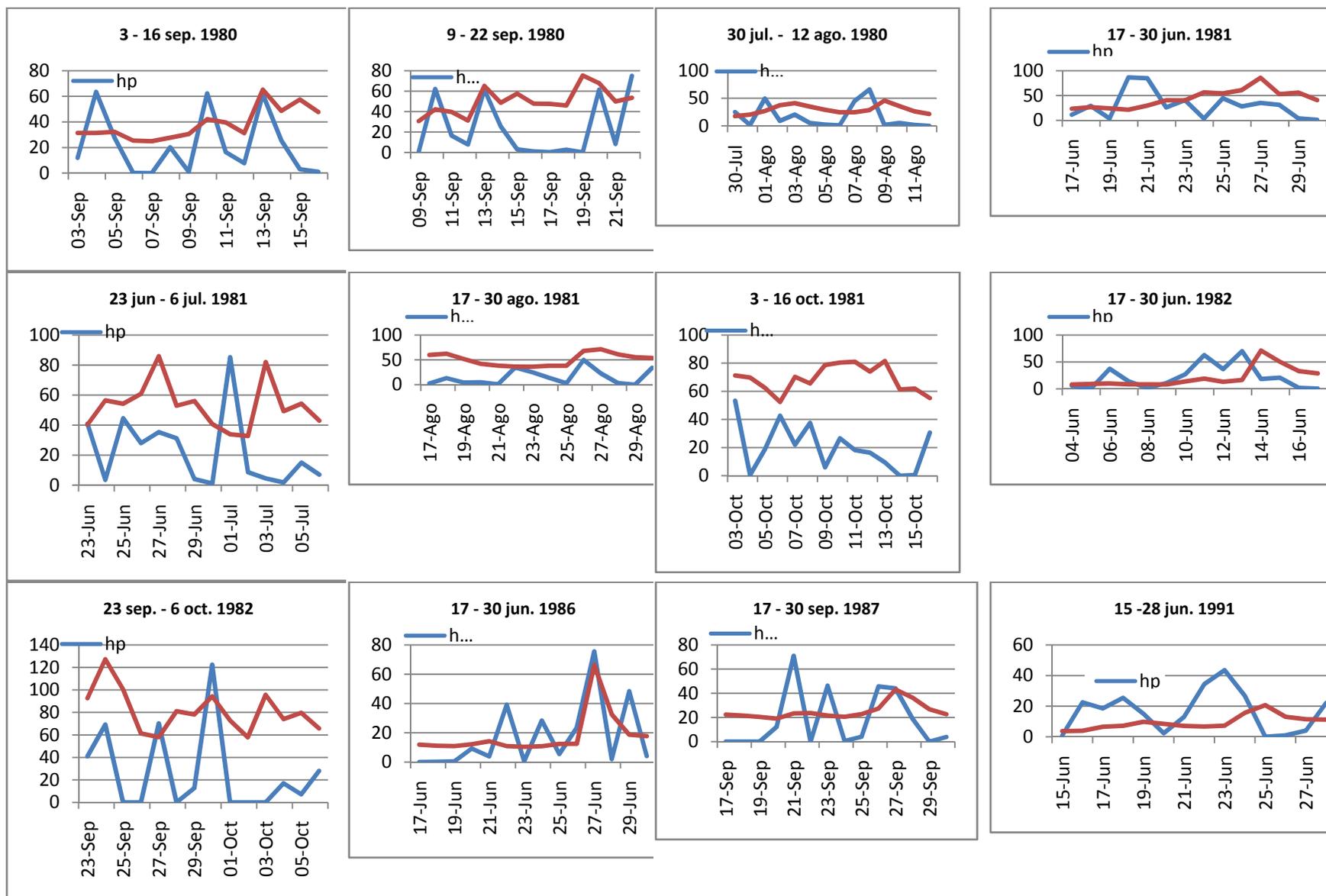


Figura A.3 Segundo criterio de selección. Tormentas que generaron gastos máximos cercanos al máximo por año.



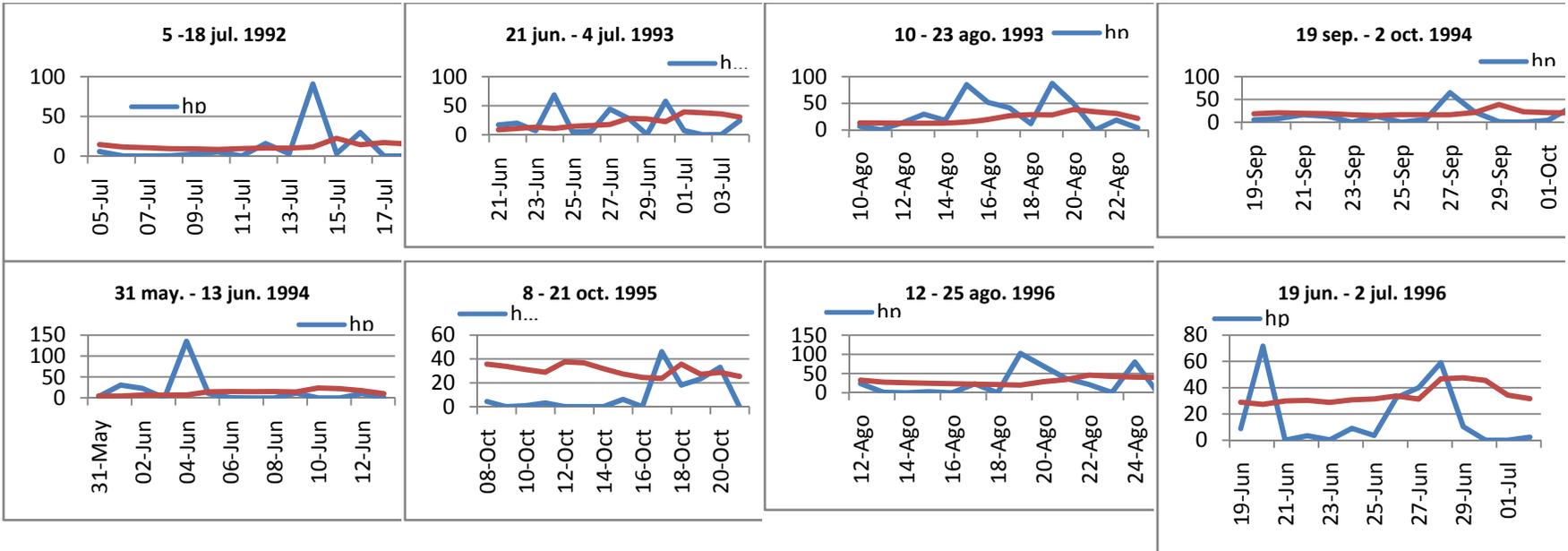
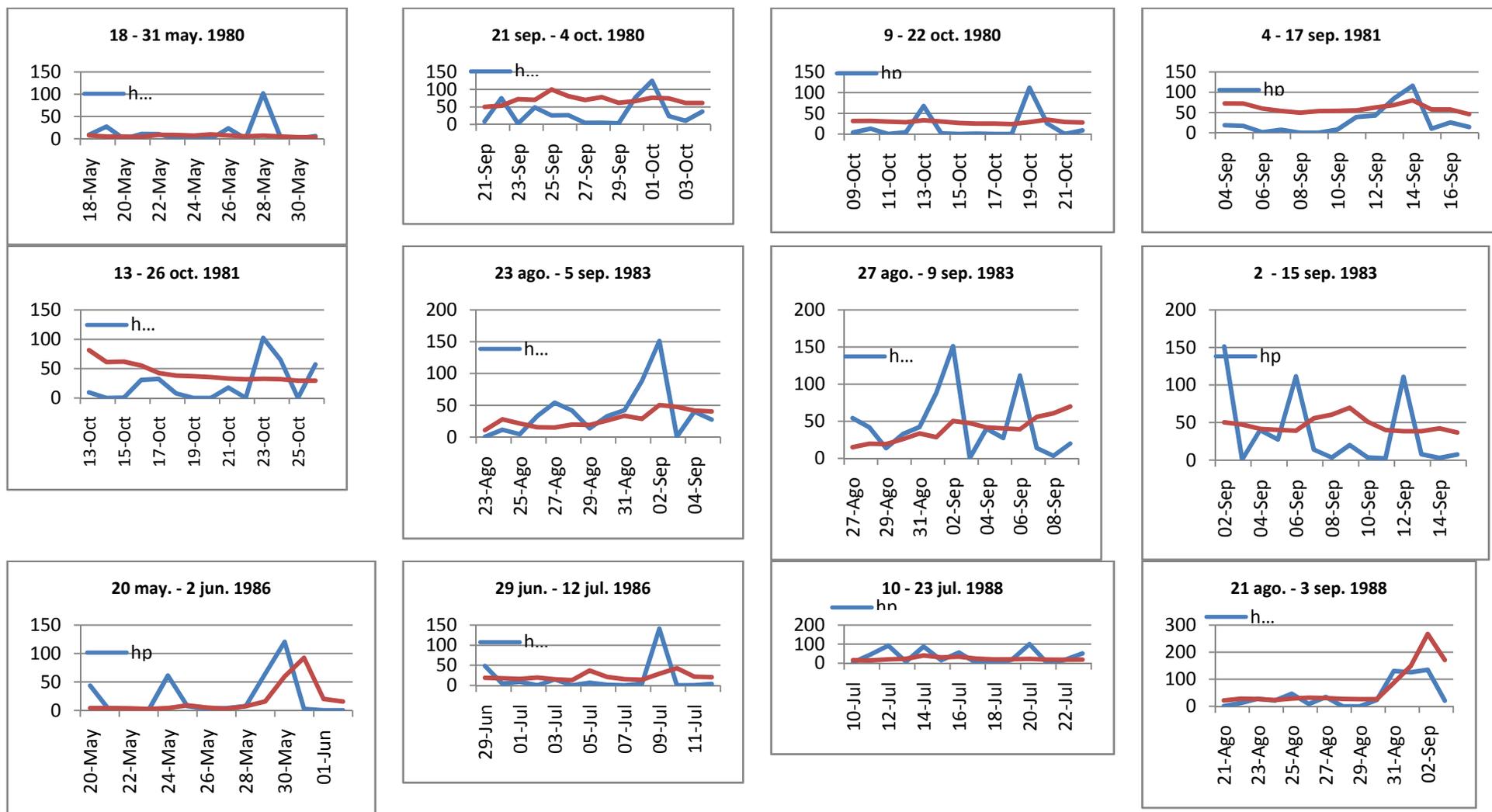
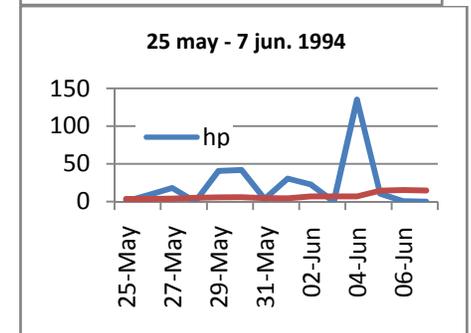
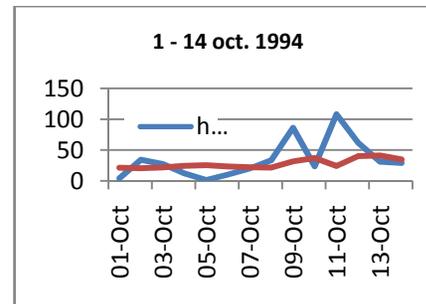
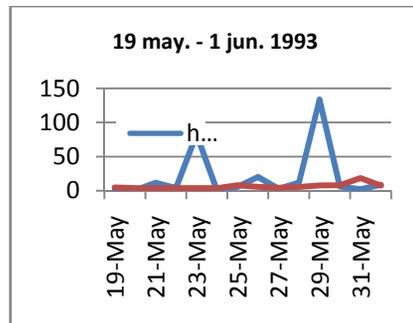
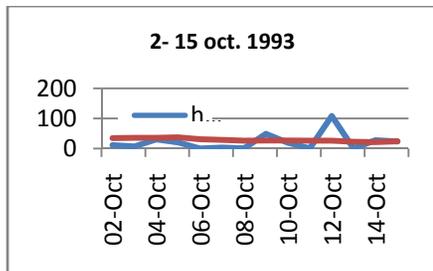
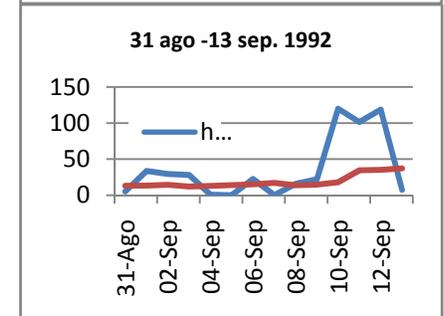
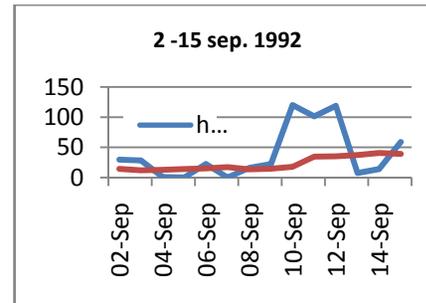
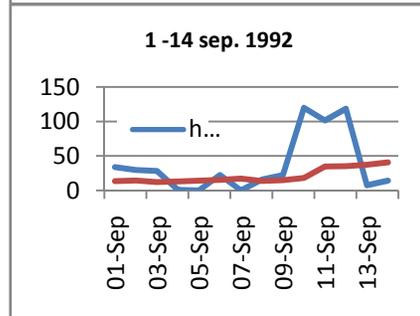
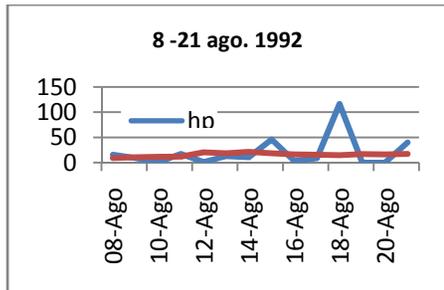
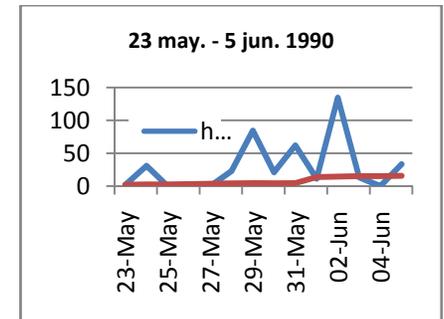
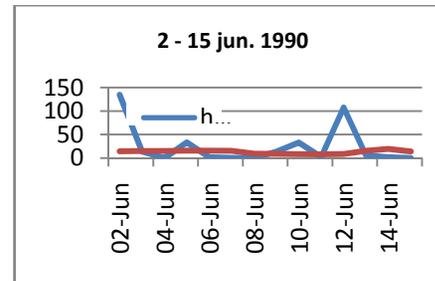
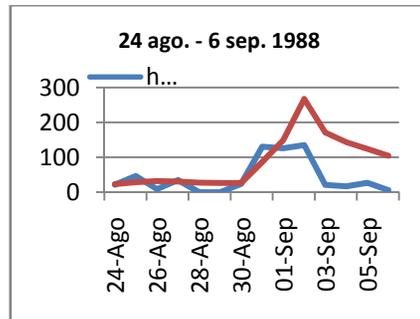
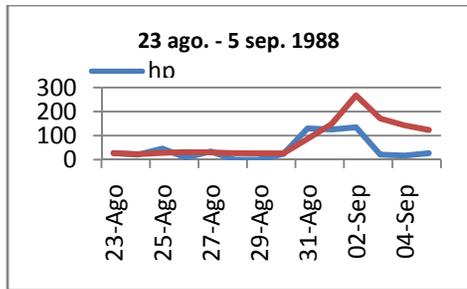


Figura A.4 Tercer criterio de selección. Tormentas que presentaron lluvias mayores a 100 mm





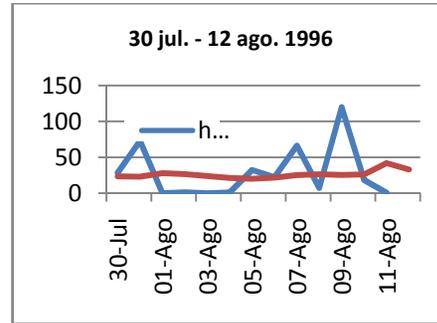
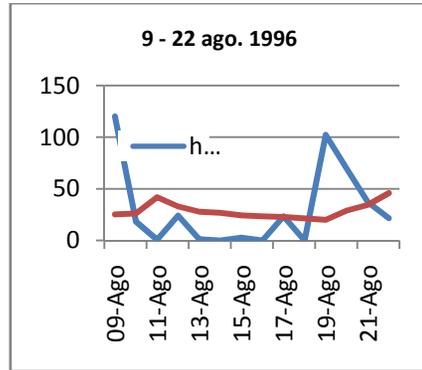
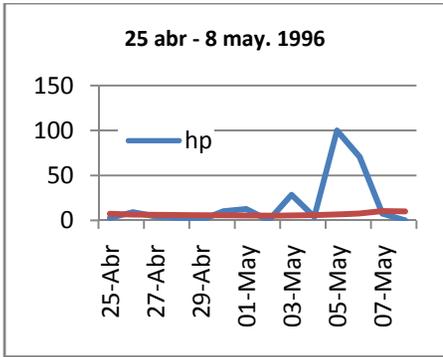
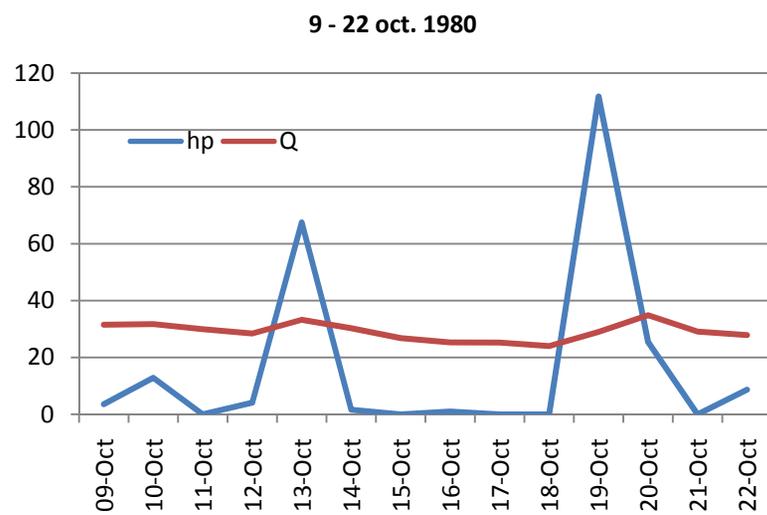
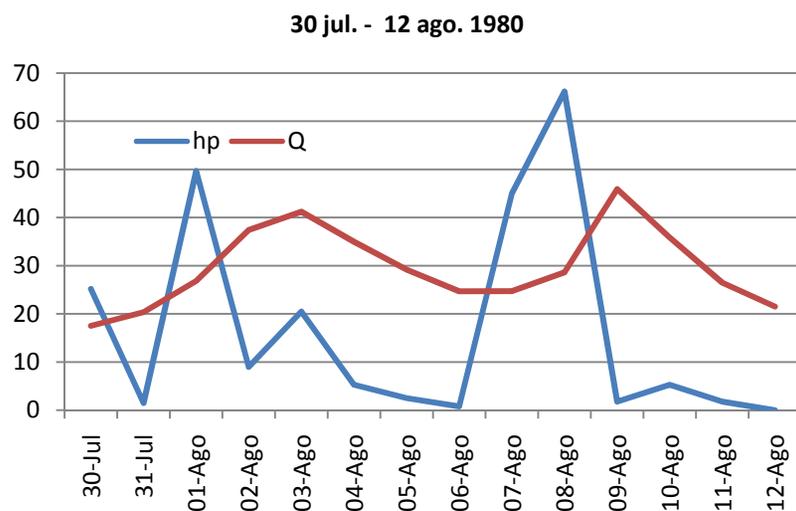
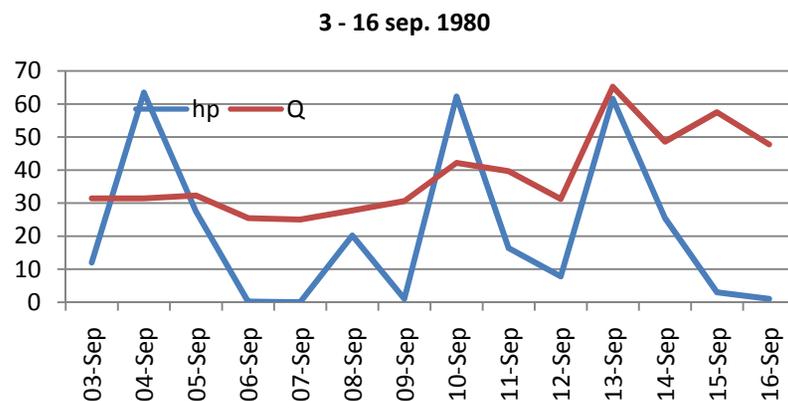
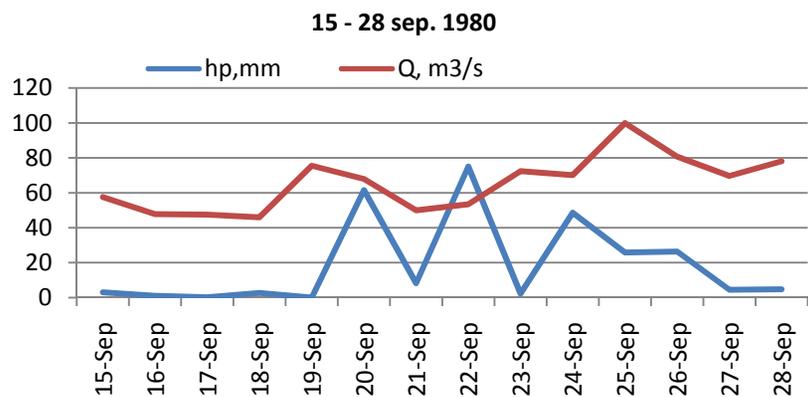
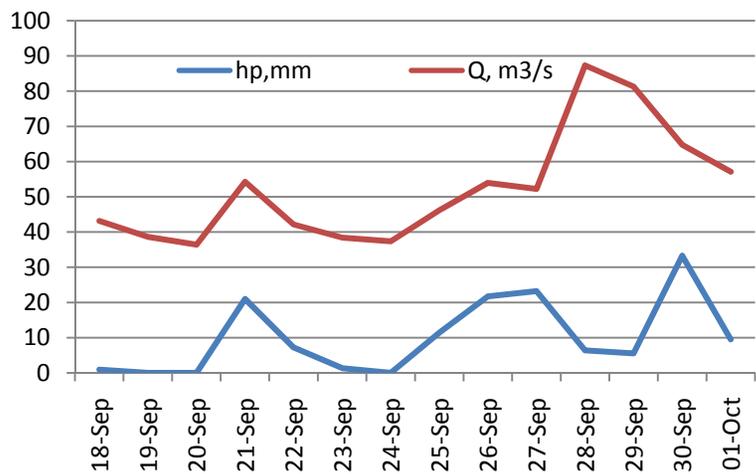


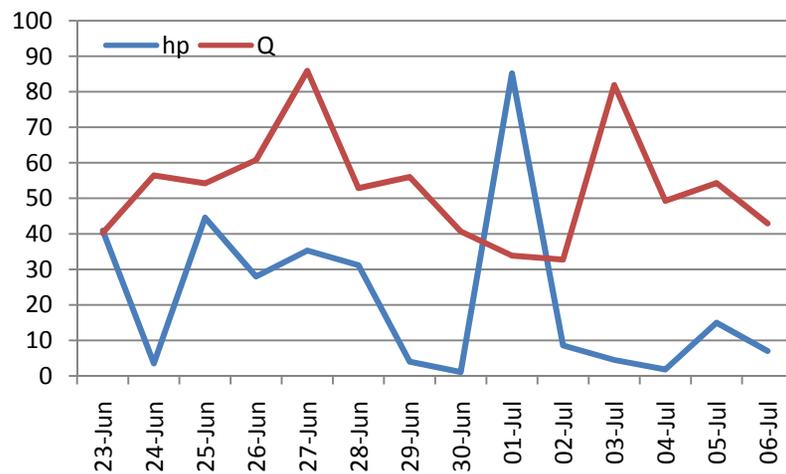
Figura A.5 Hietogramas e hidrogramas anuales de las tormentas preliminares de la década de los ochenta y noventa



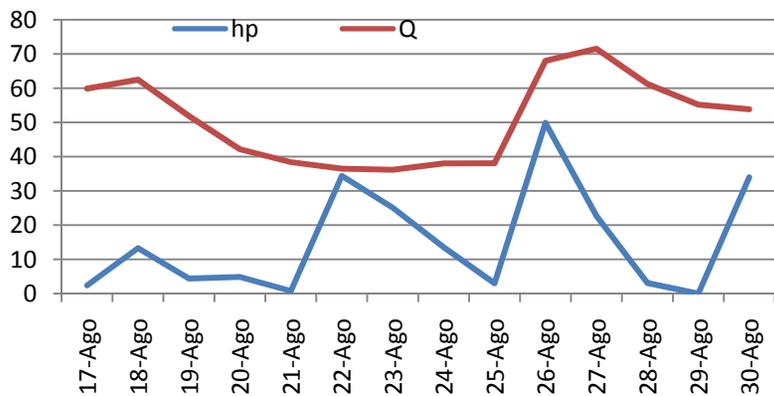
18 sep. - 1 oct. 1981



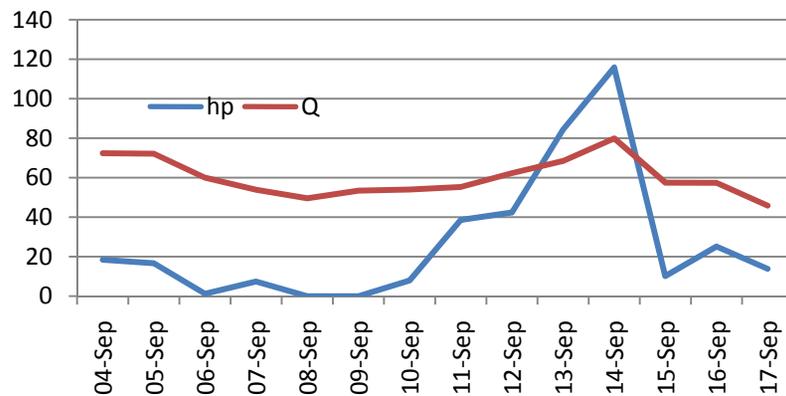
23 jun - 6 jul. 1981



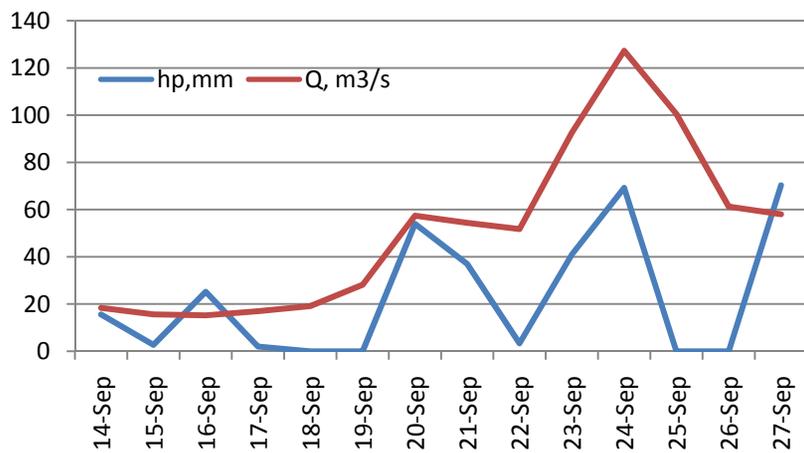
17 - 30 ago. 1981



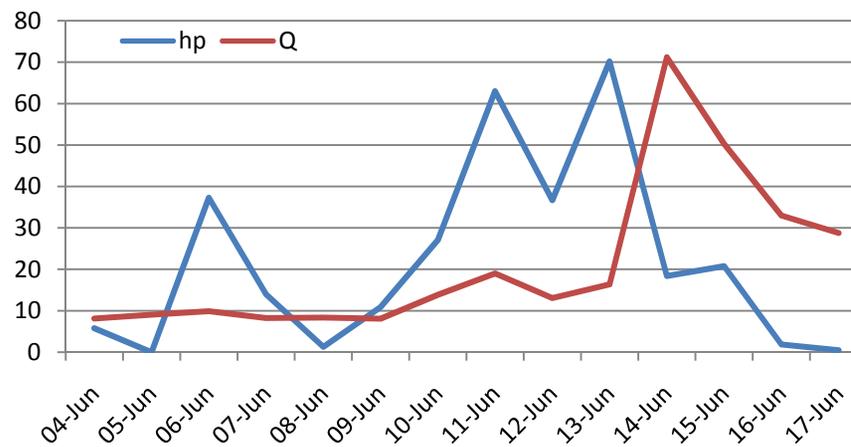
4 - 17 sep. 1981



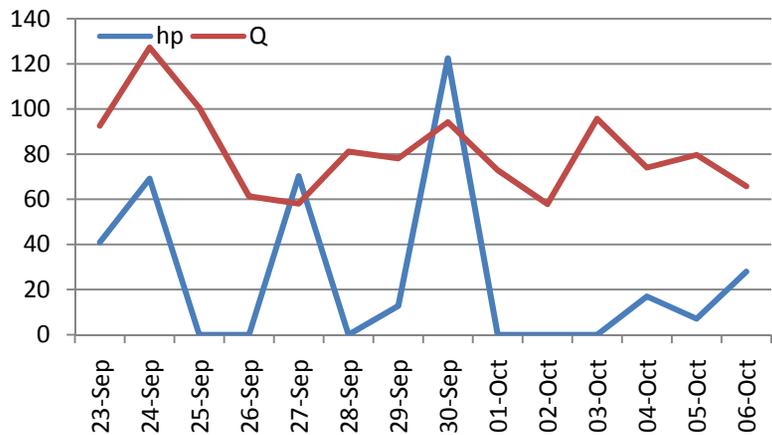
14 - 27 sep. 1982



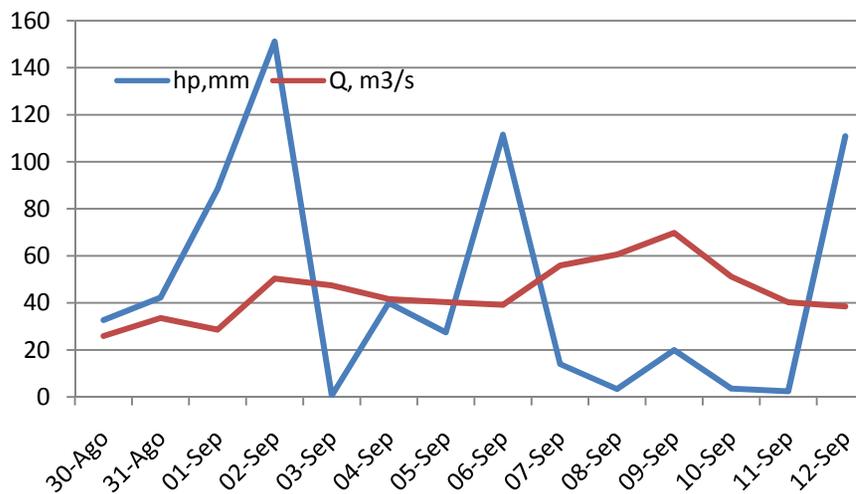
17 - 30 jun. 1982



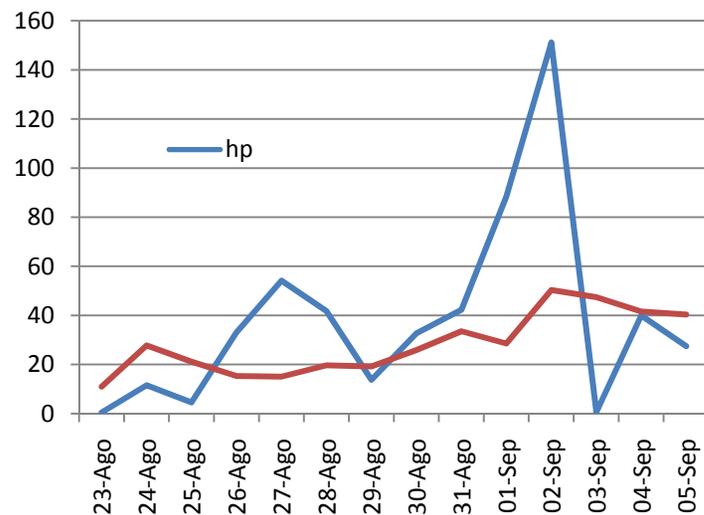
23 sep. - 6 oct. 1982



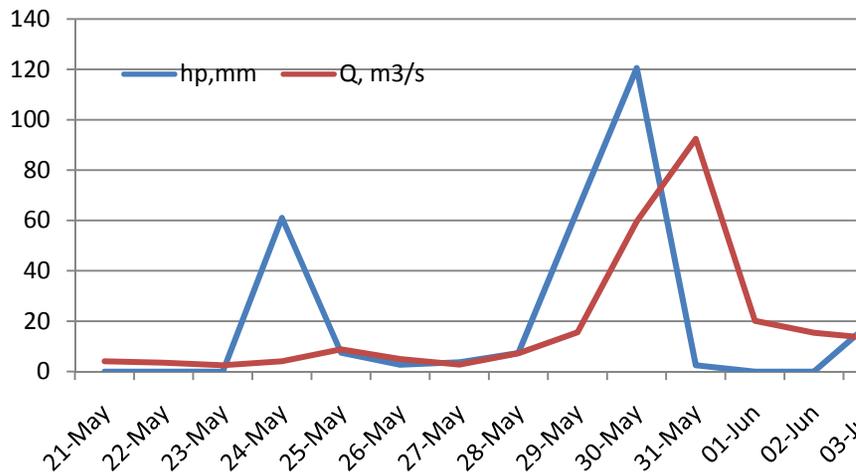
30 ago. - 12 sep. 1983



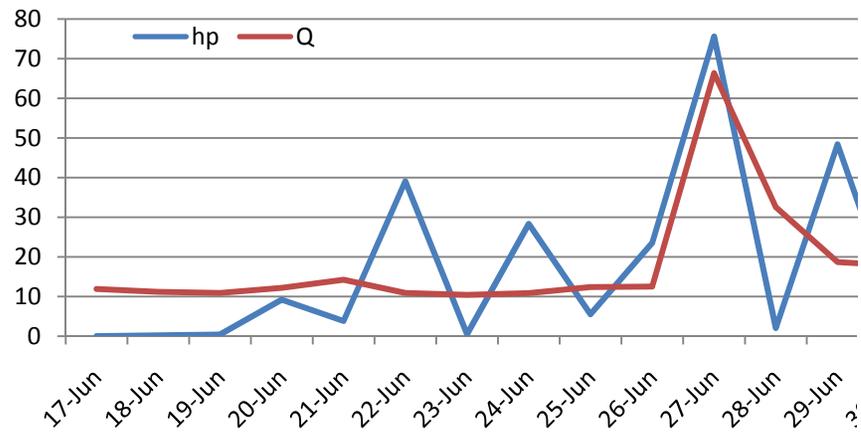
23 ago. - 5 sep. 1983



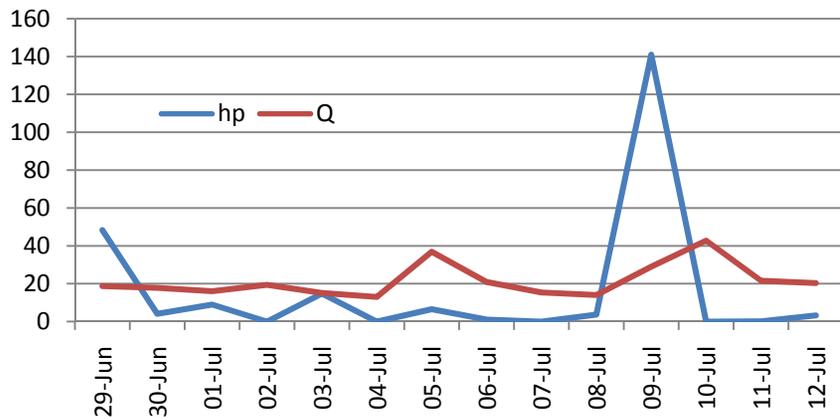
21 may. - 3 jun. 1986



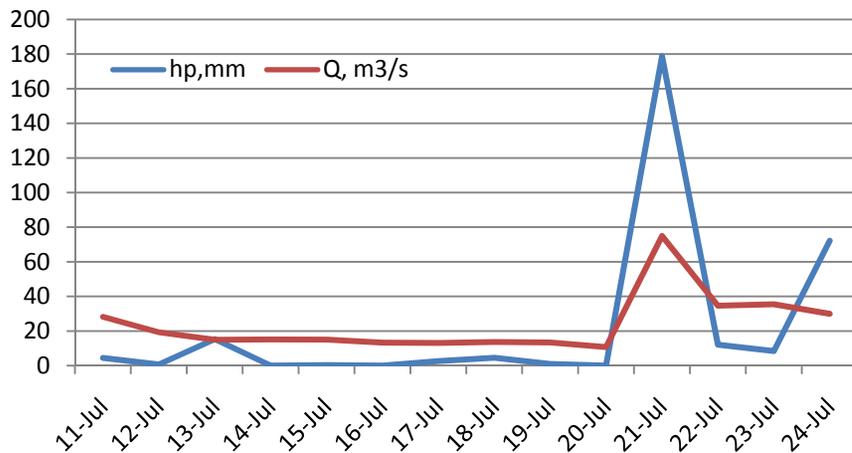
17 - 30 jun. 1986



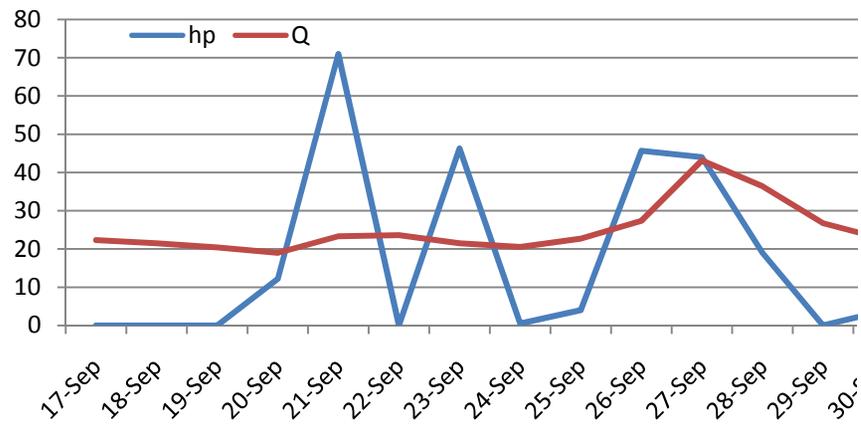
29 jun. - 12 jul. 1986



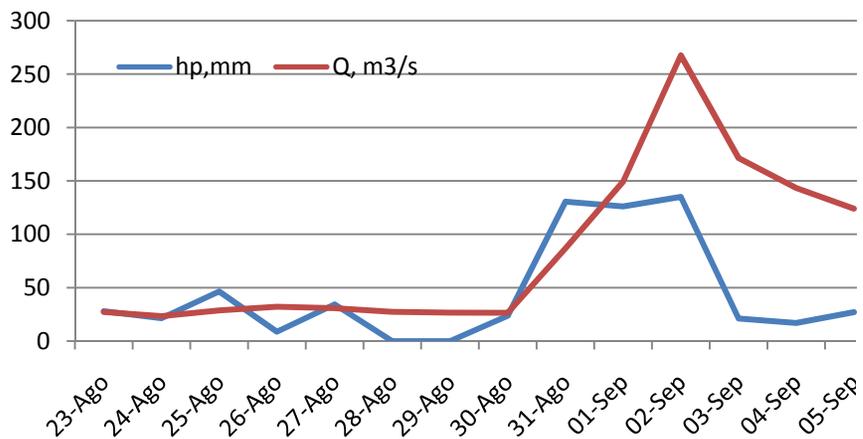
11 - 24 jul. 1987



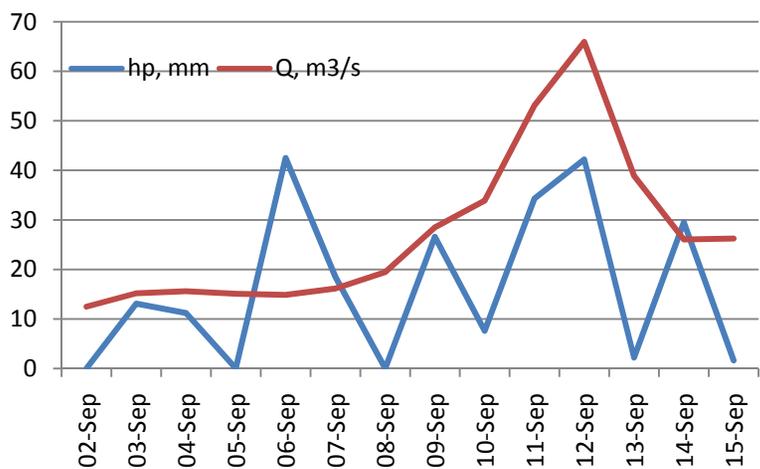
17 - 30 sep. 1987



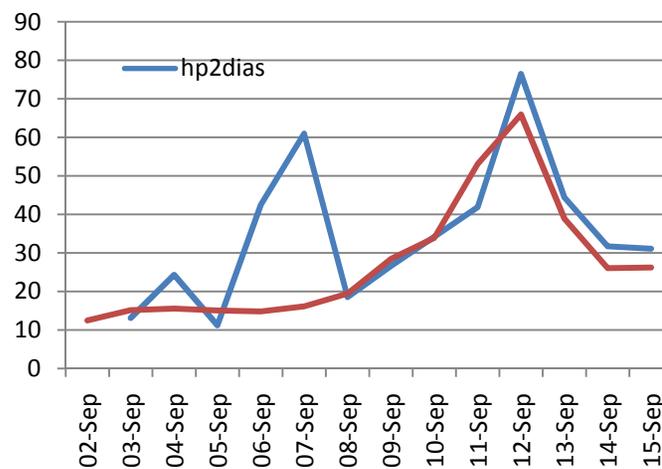
23 ago. - 5 sep. 1988



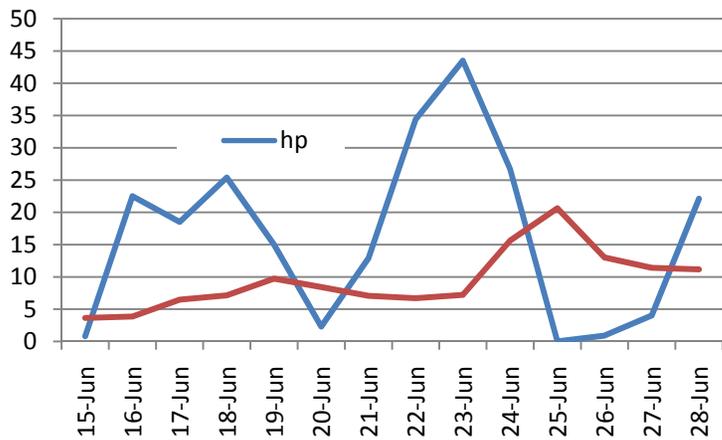
2 - 15 sep. 1990



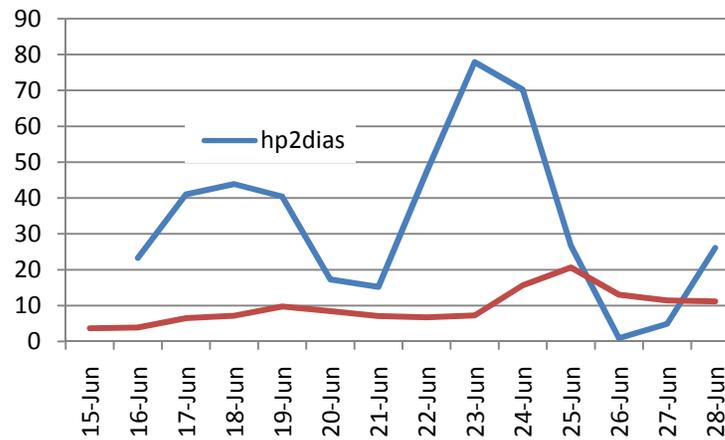
2 - 15 sep. 1990



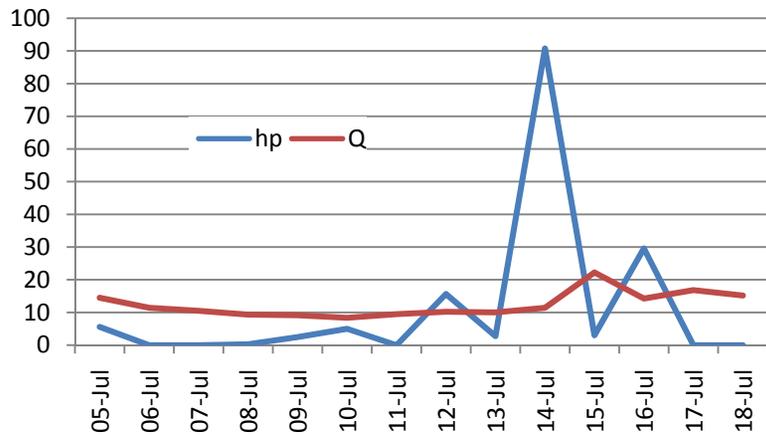
15 -28 jun. 1991



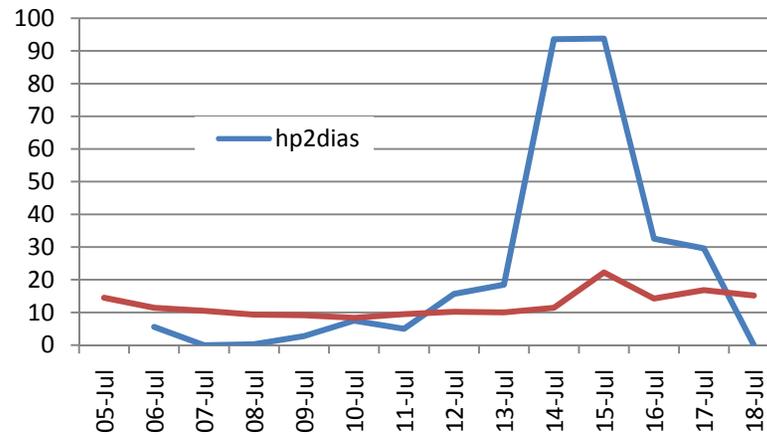
15 -28 jun. 1991



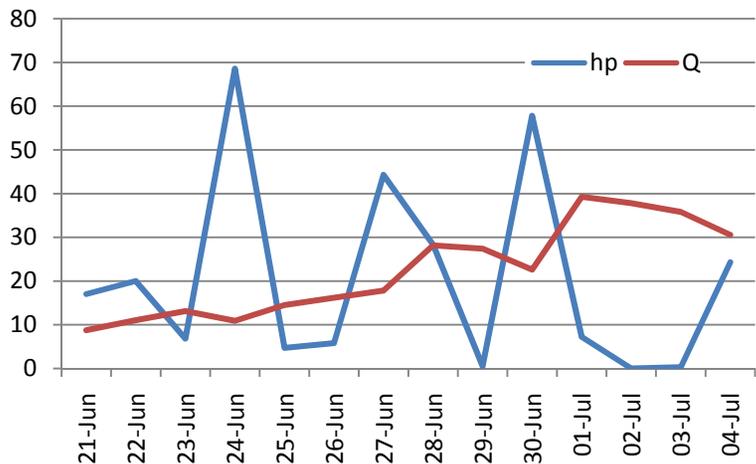
5 -18 jul. 1992



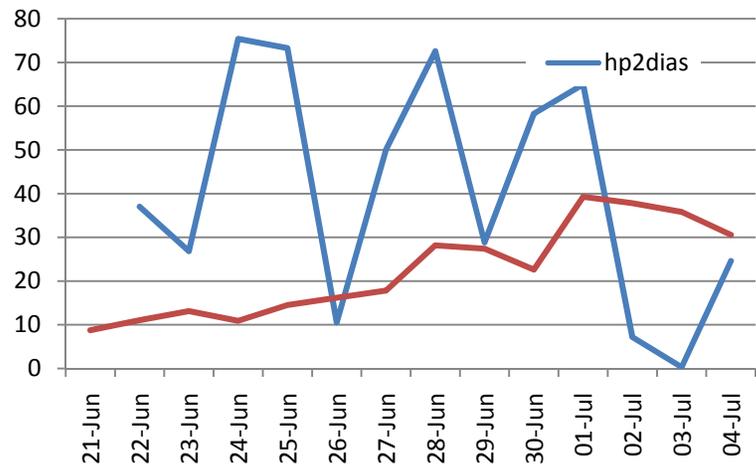
5 -18 jul. 1992



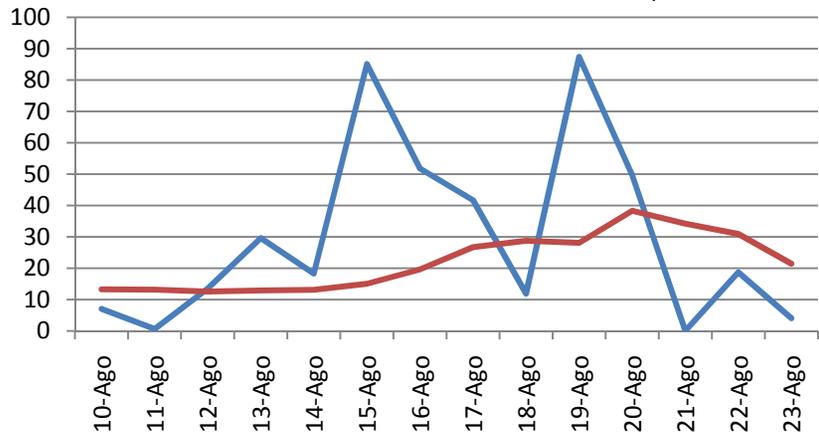
21 jun. - 4 jul. 1993



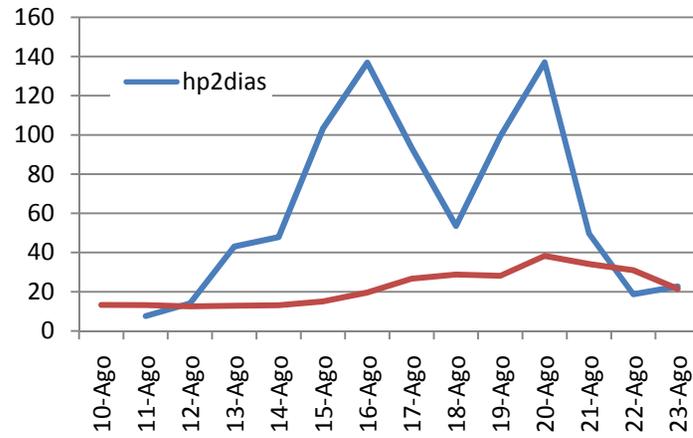
21 jun. - 4 jul. 1993



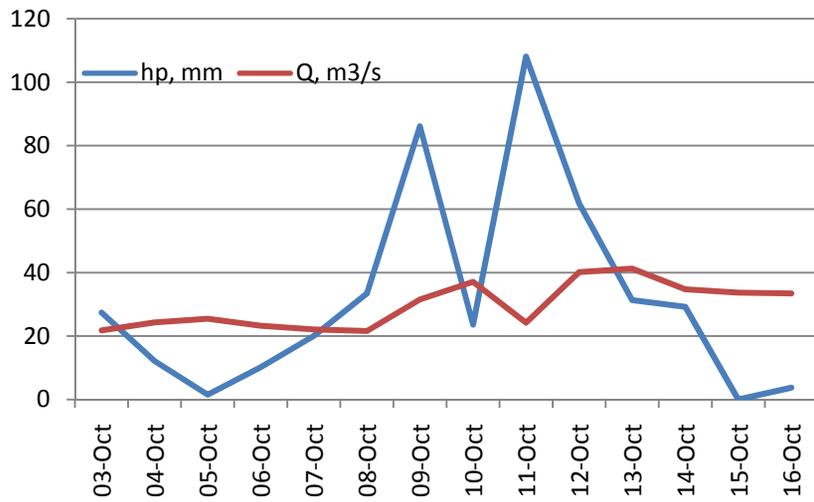
10 - 23 ago. 1993



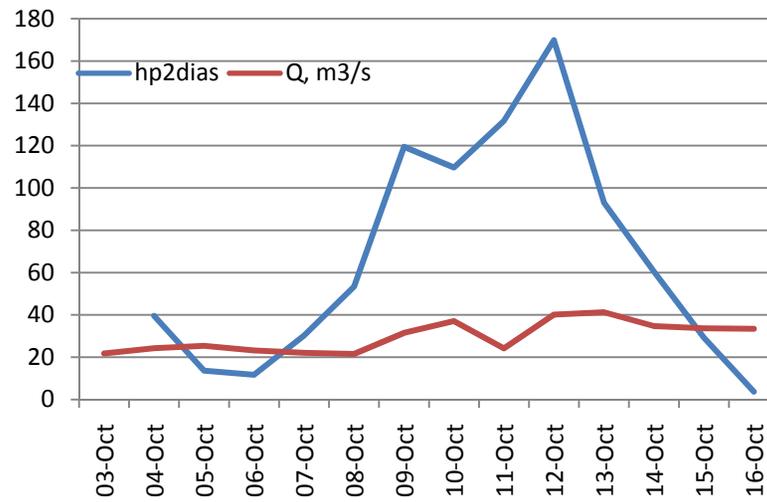
10 - 23 ago. 1993



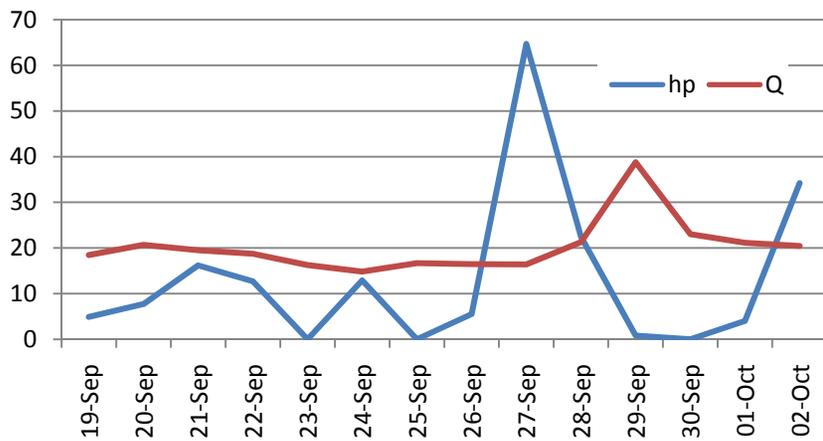
3 - 16 oct. 1994



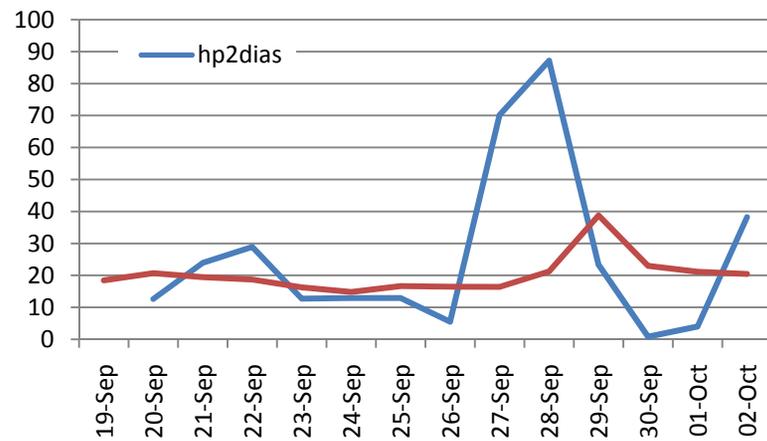
3 - 16 oct. 1994



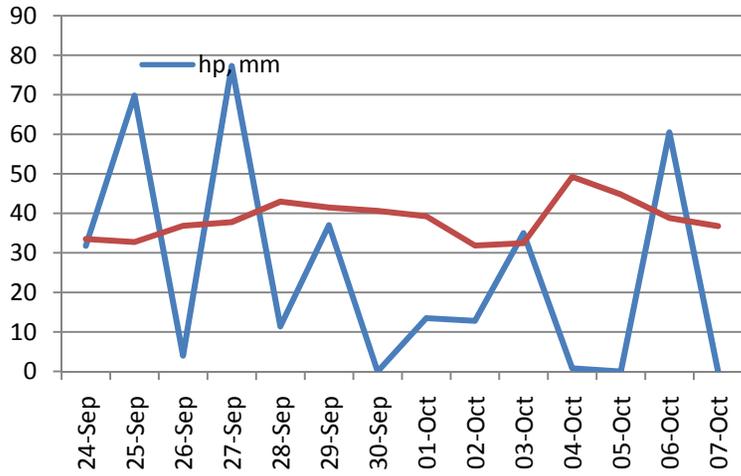
19 sep. - 2 oct. 1994



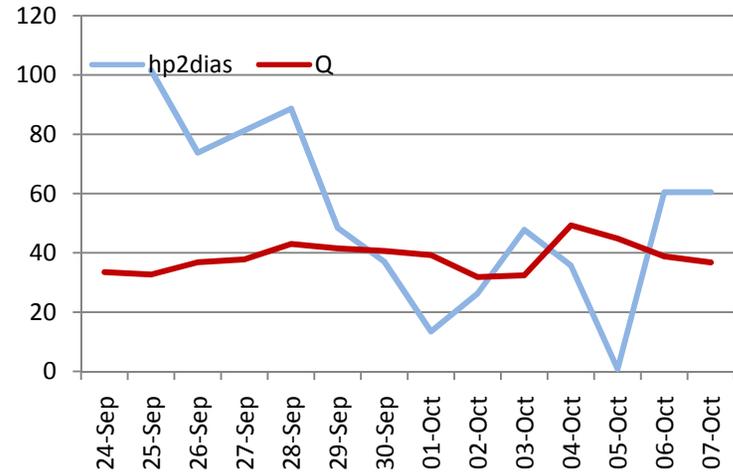
19 sep. - 2 oct. 1994



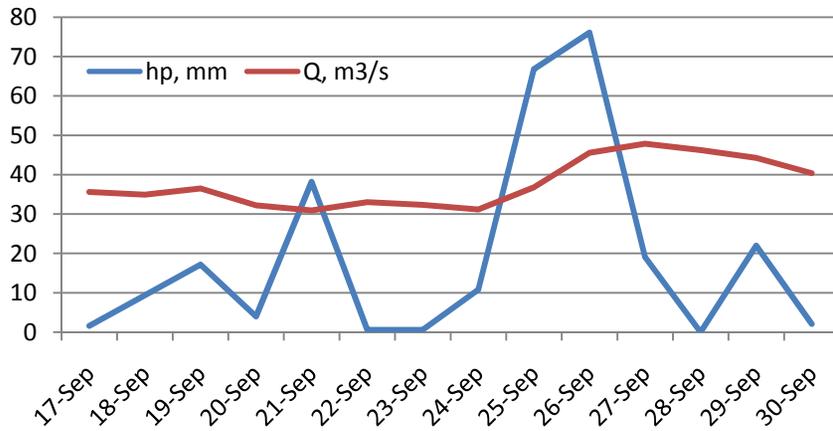
24 sep. - 7 oct. 1995



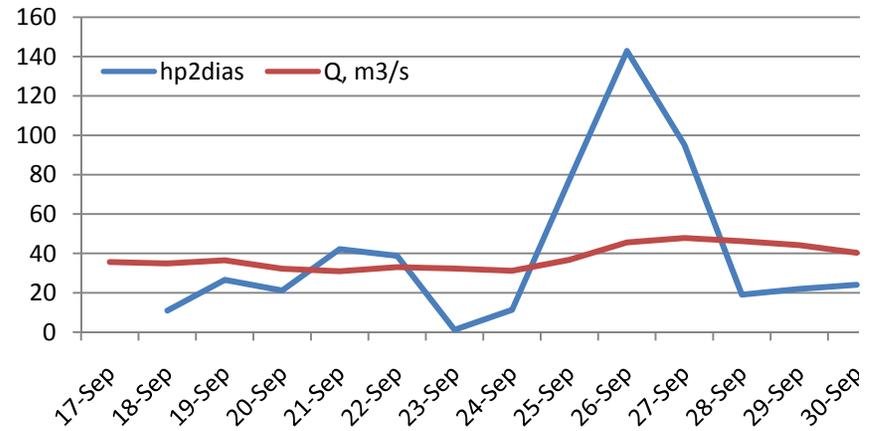
24 sep. - 7 oct. 1995



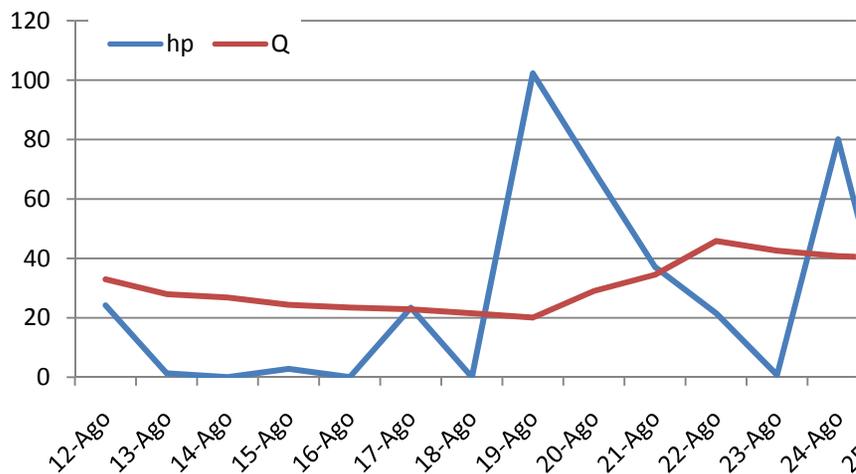
17 - 30 sep. 1996



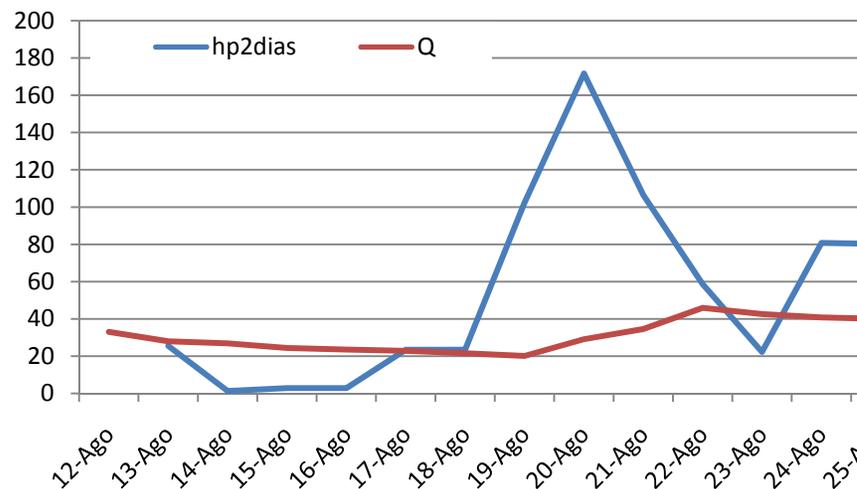
17 - 30 sep. 1996



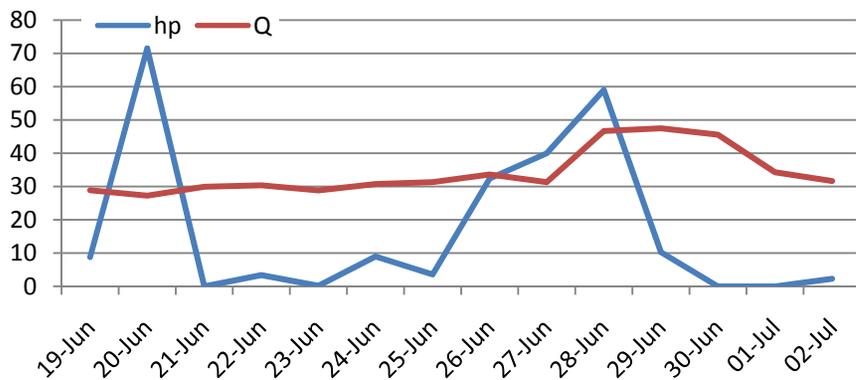
12 - 25 ago. 1996



12 - 25 ago. 1996



19 jun. - 2 jul. 1996



19 jun. - 2 jul. 1996

