



**Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ciencias Naturales Biología**

**Estructura de la Vegetación y Unidades de Respuesta  
Hidrológica, un enfoque para el modelamiento  
ambiental de cuencas en Michoacán**

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Doctor en Ciencias, Recursos Bióticos

Presenta

**Alfredo Amador García**

Santiago de Querétaro, Querétaro.  
Noviembre de 2009



## Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ciencias Naturales  
Facultad de Ingeniería  
Facultad de Psicología  
Facultad de Filosofía  
Facultad de Ciencias Políticas y Sociales  
Facultad de Química

**“Estructura de la Vegetación y unidades de respuesta hidrológica, un enfoque para el modelamiento ambiental de cuencas en Michoacán.**

### TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de la

***Doctor en Ciencias, Recursos Bióticos***

**Presenta:**

Alfredo Amador García

**Dirigido por:**

Dr. Raúl Francisco Pineda López

#### SINODALES

Dr. Raúl Francisco Pineda López  
Presidente

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortazar  
Secretario

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
Vocal

Dr. Eusebio Ventura Ramos  
Vocal

Dr. Manuel E. Mendoza Cantú  
Suplente

Biol. Jaime Angeles Angeles  
Director de la Facultad

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Noviembre 2009  
México

## RESUMEN

La respuesta hidrológica (RH) relaciona la precipitación con el escurrimiento de una superficie durante una tormenta. Es un proceso controlado por factores geológicos y edáficos así como por el uso y la cobertura del suelo, principalmente por intercepción de lluvia en el dosel de la vegetación.

Con objeto de estudiar la relación entre la estructura de la vegetación y la RH, fue evaluada primero la similitud y luego la adecuabilidad para la experimentación de 131 Áreas de Captación (AC) de una cuenca perteneciente al Río Cutzamala-Purungueo en las inmediaciones del Parque Nacional Cerro Garnica en el Estado de Michoacán. Dos AC morfométricamente similares y homogéneas en geología y suelos fueron instrumentadas con vertedores rectangulares sin contracciones laterales de flujo, estanque nivelado, data-logger de nivel y data-logger pluviométrico para medir precipitación y escurrimiento. Complementariamente se midió intercepción y escurrimiento en siete lotes experimentales representativos de distintas condiciones de vegetación en el área de estudio, y cuya selección fue el resultado del análisis de distintos atributos estructurales obtenidos en 96 sitios de muestreo.

A nivel de lotes, el 90 % de las tormentas monitoreadas, acumularon entre 10 a 40 mm, transcurrieron en menos de 4 hrs. y generaron entre 2 y 70% de escurrimiento del total de precipitación, desde la condición más estructurada de la vegetación hasta la condición de suelo desnudo. En ese mismo gradiente, la aplicación del modelo de Gash, permitió estimar porcentajes de pérdidas por intercepción, en valores de 47 % hasta 0% de la precipitación y capacidades de almacenamiento de agua en el dosel de 12 a 0 mm.

A nivel de AC, un análisis de componentes principales mostró que de once factores relacionados con el comportamiento de los hidrogramas de precipitación-escurrimiento, la duración y la magnitud de las tormentas así como el tiempo antecedente sin precipitación, acumulan casi el 80% de la variabilidad de la información. Los dos primeros componentes corresponden a parámetros que usa el modelo de Curva Numérica para estimar empíricamente el escurrimiento.

Usando en las rutinas del modelo hidrológico HEC el método de curva numérica, los valores estimados de capacidad de almacenamiento de agua en el dosel, y las series de tiempo precipitación-escurrimiento medidas a la salida de las AC, fue calibrado dicho modelo, y luego ejecutado, para simular escenarios ambientales ante distintos tipos de tormentas. La tendencia a incrementos en el escurrimiento con respecto al escenario base, muestra que es indispensable en el corto plazo, no solo programas orientados a la protección y conservación de la vegetación en las partes altas de la cuenca. También se hace necesario el diseño y aplicación de acciones que fomenten el mantenimiento de las comunidades vegetales más altamente estructuradas, incrementen los procesos de intercepción, reduzcan el escurrimiento y aumenten la fracción de humedad retenida en la cuenca.

Palabras clave: Hidrograma, Escurrimiento, Intercepción, Vegetación, HEC.

## SUMMARY

Hydrological response (HR) relates precipitation to runoff on a surface during a storm. It is a process controlled by geological and edaphic factors, as well as by land use and cover, chiefly due to the interception of rain by the vegetation canopy. With the objective of studying the relationship between the vegetation structure and the HR, we first evaluated the similitude and then the adequacy of the experimentation on 131 Catchment Areas (CA) of a basin of the Cutzamala-Purungueo River closet to the Cerro Garnica National Park in the State of Michoacán. Two morphometrically similar CA, homogeneous in geology and soil, were instrumented with rectangular weirs having no lateral flow contraction, a leveled pool, a leveling data logger and a pluviometric data logger in order to measure precipitation and runoff. Interception and runoff were also measured in seven experimental plots that were representative of the different vegetation conditions in the area being studied, the selection of which was based on the results of the analysis of different structural attributes obtained from 96 sampling sites. At the plot level, 90% of the storms monitored led to the accumulation of between 10 to 40 mm. These storms occurred in less than 4 hours and generated between 2 and 70% of total precipitation runoff, from the most structured condition of vegetation to an uncovered ground condition. With this gradient, the application of the Gash model allowed to estimate percentages of loss due to interception, with values of from 47% to 0% of the precipitation, as well as storage capacities in the canopy ranging from 12 to 0 mm. At the CA level, a Principal Component Analysis showed that the eleven factors related to the behavior of the precipitation-runoff hydrographs, the duration and magnitude of the storms, as well as the preceding time when there was no precipitation, account for almost 80% of variability in information. The first two components correspond to parameters that use the Numerical Curve model to empirically estimate runoff. Using the Numerical Curve method in the HEC hydrological model routines, the estimated water storage capacity values in the canopy and the time series of precipitation-runoff measured at the exit of the CA, we calibrated and then executed this model to simulate environmental scenarios for different types of storms. The tendency toward increases in runoff in respect to the basic scenario shows that not only programs oriented toward the protection and conservation of vegetation in the high areas of the basin are indispensable in the short-run. It is also necessary to design and apply actions that will promote the maintenance of the most highly structured vegetation communities, increase interception processes, reduce runoff and raise the retained moisture fraction in the basin.

(KEY WORDS: Hydrograph, runoff, interception, vegetation, HEC).

***A mis padres:  
Mamá Chenchis<sup>†</sup> y Papá Lupe<sup>†</sup>***

***A mis soles:  
Chiquis y Pingo...y probablemente alguien en camino***

***A Coqui<sup>†</sup>***

## AGRADECIMIENTOS

A las instituciones que hicieron posible este trabajo: La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, La Universidad Autónoma de Querétaro y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Al Dr. Raúl Francisco Pineda López (UAQ) por su dirección y asesoría en el total del trabajo.

Al Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortazar (UAQ) por su apoyo en los aspectos de la instrumentación experimental de las áreas de captación.

Al Dr. Aurelio Guevara Escobar (UAQ) por sus meticulosas observaciones en diferentes fases del trabajo.

Al Dr. Luis Hernandez Sandoval (UAQ) por su comentarios en los aspectos de vegetación.

Al Dr. Eusebio Ventura Ramos (UAQ) por su apoyo en la instrumentación y sus comentarios al documento.

Al Dr. Manuel Mendoza Cantú (CIGA-UNAM) por su apoyo con literatura y observaciones a lo largo de todo el trabajo.

Al Dr. Valentino Sorani Dalbón (UAEM) por su apoyo en materia de SIG, percepción remota y modelamiento.

A la Dra. Manida (UAQ), por sus observaciones en materia de vegetación, así como por las invaluable escenas landsat ETM que me facilitó.

Al Dr. Edmundo Díaz Pardo (UAQ), por compartir sus apreciaciones ecológicas del trabajo.

A la M.Sc. Laura Torres Rodríguez (North Eastern Illinois University), quien me apoyó en la colecta, herborización e identificación de material botánico.

A la Biol. Consuelo Medina García y al Dr. Alejandro Velásquez del (CIGA-UNAM), por su apoyo y orientación bibliográfica en el análisis de los distintos sistemas clasificatorios de la vegetación.

Al Biol. Oliver Felipe Cisneros que compartió extenuantes jornadas de trabajo construyendo e implementando los vertedores y lotes experimentales, sin los cuales este trabajo no se hubiera llevado a cabo.

A “Manis” y a Don Benjamín, quienes me permitieron muestrear y desplegar instrumentos para esta experimentación en sus predios. A Don Alejandro y a sus hijos (Moisés y Gustavo), al primero por acceder a construir y reparar los

vertedores en el fondo de esas barrancas (las AC 18 y 30), y a los muchachos, quienes recopilaron las lecturas diarias de los lotes de escurrimiento durante el periodo de lluvias de 2004 en San José de la Cumbre, Mich.

Al Dr. Edmundo López Barbosa y la Srita. Alejandra Astrid por apoyarme en las gestiones y trámites para obtener la oportunidad a la licencia que me permitió realizar este posgrado.

A la Biol. Tzinthia J. Torres Moreno, el Biol. Sergio Amador Hernández y el Ing. Ernesto Amador Hernández, quienes me apoyaron en los muestreos a la vegetación.

Al Dr. Eduardo Antaramián Harutunián y al Dr. Juan M. Ortega Rodríguez de la UMSNH, quienes me proporcionaron orientaciones y valiosa información cartográfica.

Al Biol. J. Emmanuel Pintor Aguilera y el Dr. Alberto Gómez-Tagle Chávez por su siempre entusiasta cooperación y por haberme proporcionado también valiosísima información geográfica.

Al Dr. Eleazar Carranza González quien me orientó en aspectos administrativos del programa de Doctorado de la UAQ.

Al F.M. Víctor Muratalla Álvarez, que me ha sacado de mil problemas en materia de informática y también me apoyó en trabajo de campo durante el diseño y la construcción de los vertedores.

Al Sr. Miguel Cervantes Pérez y la Biol. Berenice Tello Bejarano que me abrieron las puertas de su casa en Morelia y me brindaron valioso apoyo logístico.

Al Dr. Ricardo M. Pérez Munguía, a su esposa la Sra. Raquel, y a los Biólogos Chava y Verónica de la UAQ quienes en innumerables ocasiones me apoyaron con aspectos académico-administrativos.

Al Biol. Miguel Silva, prestador de servicios técnicos forestales y amplio conocedor de las montañas y bosques michoacanos, que me introdujo con la comunidad de San José de la Cumbre.

A la Dra. Erna López Granados, el Biol. J. Antonio Salgado Maldonado, el Dr. Hugo Zepeda Castro, el Dr. Francisco Javier Díaz Perea, el M.C. Alfredo Patiño, el M.C. Gerardo Rodríguez, el M.C. Juan Pulido, el M.C. Arturo Carrillo, el Biol. Mario M. Romero, el Dr. Jones (UAQ), con todos ellos(as) estoy en deuda por sus desinteresados comentarios, observaciones, artículos, libros, materiales, trámites, correos y ánimos para seguir adelante con el proyecto, lo que en distintos momentos de estos cuatro años me fueron ofrecidos de su parte.

	<b>INDICE</b>	<b>Página</b>
Resumen		i
Summary		ii
Dedicatorias		iii
Agradecimientos		iv
Índice		vi
Índice de cuadros		viii
Índice de figuras		x
Listado de mapas		xii
Listado de símbolos y abreviaturas empleados en el texto		xiii
I. INTRODUCCIÓN		1
II. REVISIÓN DE LITERATURA		3
2.1 Generalidades		3
2.2 La Vegetación y la estructura de la vegetación		3
2.3 Escurrimiento y Unidades de Respuesta Hidrológica		6
2.4 El papel de la vegetación en la fase terrestre del ciclo hidrológico a través de la Intercepción de Lluvia		9
2.5 Vegetación y Percepción Remota		20
2.6 Vegetación y modelamiento hidrológico		22
2.7 Relevancia del presente trabajo en el contexto del modelamiento ambiental		29
III. OBJETIVOS Y METODOLOGIA		31
3.1 Hipótesis de trabajo y diseño experimental		31
3.2 Objetivos		32
3.3 Fases del trabajo		33
3.4 Fase I: Caracterización del contexto físico del área de estudio		34
3.5 Fase II. Estructura de la vegetación del área de estudio y de las AC experimentales		38
3.6 Fase III. Instrumentación de AC y lotes de escurrimiento experimentales		43
3.7 Fase IV: Calibración del Modelo Hidrológico		51
3.8 Fase V: Generación de Escenarios Ambientales		53
IV. RESULTADOS Y DISCUSION		54
4.1. Fase I: Caracterización del contexto físico del área de estudio		54
4.2 Fase II. Caracterización de la Vegetación en el área de estudio		62
4.3 Fase III. Instrumentación de AC y lotes de escurrimiento experimentales		75
4.4 Resultados y análisis de los datos de los lotes de escurrimiento y aplicación del Modelo de Gash		80
4.5 Fase IV: Calibración del Modelo Hidrológico. Hietogramas e hidrogramas observados y simulados en los puntos de deyección de las AC 18 y 30		89
4.6. Fase V: Generación de Escenarios Ambientales		97
4.7 Discusión		110
4.8. Conclusiones		119
LITERATURA CITADA		123



APENDICE		Página
(ver archivo electrónico en CD)		
1. ECUACIONES GENERALES Y ASPECTOS METODOLÓGICOS		A-1
2. PARÁMETROS FÍSICOS DE LAS 131 ÁREAS DE CAPTACIÓN		A-14
3. ABUNDANCIA PROPORCIONAL DE PARÁMETROS LITO-EDAFOLÓGICOS Y CLASES DE VALORES NDVI (año 2000) DE LAS 131 ÁREAS DE CAPTACIÓN		A-19
4. RELACIÓN DE FAMILIAS, ESPECIES Y GÉNEROS DE PLANTAS VASCULARES COLECTADOS EN LAS AC 18 Y 30		A-24
5. LAMINAS DE ESCURRIMIENTO EN LOS DISTINTOS TRATAMIENTOS OBSERVADOS EN BOSQUE, MATORRAL Y HERBAZAL A NIVEL DE LOTES EXPERIMENTALES		A-26
6. LAMINAS INTERCEPTADAS EN LOS DISTINTOS TRATAMIENTOS OBSERVADOS (EN CONDICION ARBOREA) EN LOS LOTES EXPERIMENTALES		A-29
7. CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS EVENTOS DE PRECIPITACION MUESTREADOS CADA 5 MINUTOS EN LAS ZONAS DE DEYECCION DE LAS AC EXPERIMENTALES		A-31
8. RELACION DE PARAMETROS EVALUADOS DE LAS TORMENTAS Y LAS DESCARGAS OBSERVADOS Y CALCULADOS MEDIANTE EL MODELO DEL SCS POR AC EXPERIMENTAL		A-34
9. VALORES PONDERADOS DE S Y CN INGRESADOS AL MODELO GEOMÉTRICO DEL ÁREA DE ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DEL ESCENARIO BASAL.		
• PRECIPITACION OBSERVADA EN 7 EVENTOS DE 2004		
• RESULTADOS DE LA SIMULACION DE FLUJOS DE DESCARGAS PARA DICHOS EVENTOS EN TRES ESCENARIOS AMBIENTALES		A-36
• VALORES PONDERADOS DE S Y CN INGRESADOS AL MODELO GEOMÉTRICO DEL ÁREA DE ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DEL <i>ESCENARIO UNO</i> . LOS VALORES DE PERIODO DE RETARDO ( $T_r$ ) PERMANECEN IGUALES EN TODAS LAS SUBUNIDADES.		
10. VALORES PONDERADOS DE S Y CN INGRESADOS AL MODELO GEOMÉTRICO DEL ÁREA DE ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DEL <i>ESCENARIO DOS</i> . LOS VALORES DE PERIODO DE RETARDO ( $T_r$ ) Y EL RESTO DE LOS VALORES DE S Y CN PARA LAS DEMÁS SUBUNIDADES PERMANECEN IGUALES.		A-46

<b>Cuadro</b>	<b>Índice de cuadros</b>	<b>Página</b>
2.1.	Correspondencia aproximada entre los términos nomenclaturales de diferentes sistemas de clasificación de la vegetación de México según diferentes autores.	5
4.1.	Abundancia proporcional y numérica de AC de primer orden, falladas o fracturadas.	59
4.2.	Matrices de similitud de las AC evaluadas.	59
4.3.	Valores de los parámetros físicos y de densidad de cobertura (NDVI) de los pares de AC evaluadas como más similares mediante el análisis UPGAM.	60
4.4.	Sistema de clasificación de comunidades vegetales del área de estudio.	140
4.5.	Matrices de transición de cambios de vegetación y usos de suelo en el área de estudio de 1983 a 1994 y de 1994 a 2003.	69
4.6.	Valores relativos y de importancia de la comunidad de oyamel.	70
4.7.	Valores relativos y de importancia de la comunidad de Hojosas	71
4.8.	Valores relativos y de importancia de la comunidad de enclave mesófilo.	72
4.9.	Valores relativos y de importancia de la comunidad de pino-encino dispersa.	73
4.10.	Valores relativos y de importancia de la comunidad de pino-encino abierto.	74
4.11.	Valores relativos y de importancia de la comunidad de pino-encino compacto	75
4.12.	Valores relativos y de importancia del Matorral de <i>Baccharis</i>	75
4.13.	Fórmulas climáticas y promedio de precipitación en las estaciones cercanas al área de estudio.	76
4.14.	Flujos (m <sup>3</sup> /s) esperados conforme a diversos modelos (citados por Smajstrala & Harrison 1981), en el vertedor rectangular diseñado.	80
4.15.	Rangos de eventos de precipitación acumulada en 24 hrs. observados mediante pluviómetro	81
4.16.	Estadísticos descriptivos de la escorrentía por rango de precipitación, medida en los distintos tratamientos a diferentes estructuras de comunidad vegetal.	82
4.17.	Resultados del análisis de varianza del escurrimiento fustal (SF) por rango de precipitación acumulada en 24 hrs (ppt) y estructura de comunidad vegetal arbórea (tratamientos 1 a 4).	86
4.18.	Balance proporcional de la precipitación incidente por lote experimental y valor estimado de S.	87
4.19.	Totales de la varianza explicada en los datos de precipitación y escurrimiento en el PCA.	90
4.20.	Matriz rotada por el método Varimax con Normalización Kaiser del ACP para los datos de ambas AC.	91
4.21.	Características de los eventos seleccionados y cuyas series de tiempo fueron usadas en la calibración del modelo HEC-HMS	93
4.22.	Valores de contraste de las simulaciones con los valores optimizados del modelo HEC-HMS para los pares de tormentas evaluadas.	97
4.23.	Números de curva para los tipos vegetación y usos de suelo del área de estudio (Adaptado de Chow et al. 1994).	99

<b>Cuadro</b>	<b>Índice de cuadros</b>	<b>Página</b>
4.24.	Escenario basal representado por 6 eventos de un rango de 4.8 a 12.77 mm y evento extremo del año 2004 de 43 mm en las condiciones de vegetación y uso del suelo del área de estudio en 2003.	100
4.25.	Matriz de transición de vegetación y uso de suelo del periodo correspondiente a 2003 y la proyección al año 2013 conforme al procedimiento MARKOV-CA_MARKOV en el sistema Idrisi 32.	186
4.26.	Escenario 1, representado por 6 eventos de un rango de 4.8 a 12.77 mm y evento extremo de 43 mm con las características presentadas en el año 2004 en las condiciones de vegetación y uso del suelo del área de estudio proyectadas al año 2013.	104
4.27.	Escenario 2, representado por 6 eventos de un rango de 4.8 a 12.77 mm y evento extremo de 43 mm con las características presentadas en el año 2004 en las condiciones de vegetación y uso del suelo del área de estudio proyectadas al año 2013 considerando una masa forestal conservada dentro del polígono del área decretada como Parque Nacional.	106
4.28.	Relación de resultados sintéticos de otros trabajos relacionados con interceptación.	112

<b>Figura</b>	<b>Índice de figuras</b>	<b>Página</b>
2.1.	Hidrogramas comparativos de la precipitación y el escurrimiento (Adaptado de Chow et al. 1994).	6
2.2.	Esquematación de los principales flujos de agua en la fase terrestre del Ciclo Hidrológico en ecosistemas forestales (modificado de Schellekens 2000 y Van Wijk et al. 2001).	8
2.3.	Esquema de la relación entre la capacidad de almacenamiento de agua por área de dosel ( $S_C$ ) y capacidad de almacenamiento de agua por el dosel por área del terreno ( $S_G$ ), cuando el dosel no cubre en un 100% el terreno (de acuerdo con Zeng et al. 2000). C es la fracción de cobertura del terreno por el dosel y E la evaporación del agua interceptada que ocurre en las áreas vegetadas.	19
2.4.	Diversidad y clasificación de sensores remotos (Modificado de <a href="http://rst.gsfc.nasa.gov/">http://rst.gsfc.nasa.gov/</a> ).	21
2.5.	Esquematación del procedimiento experimental convencional en cuencas apareadas para determinar el efecto sobre el balance hídrico de la conversión de uso de suelo (adaptado de Hewlett 1982).	23
3.1.	Ejemplo de polígono seleccionado como campo de entrenamiento para la clasificación de la escena ETM del año 2000, a partir de la ortofoto digital de INEGI 1994 y recorridos de campo en 2003-2004.	40
3.2.	Procesamiento de las fotografías digitales verticales para la obtención de valores promedio de porosidad óptica.	43
3.3.	Esquema del vertedor rectangular para medición de escorrentía en las respectivos afloramientos de las AC experimentales.	45
3.4.	Instrumentación en el aforo de la AC18 para el registro de niveles de caudales e intensidades de precipitación.	46
3.5.	Disposición de recipientes para la medición de escurrimiento en los lotes experimentales.	48
3.6.	Extremo de la canaleta de lámina de cartón utilizada para la estimación de Precipitación Directa (troughfall o TF) que es la que alcanza el suelo de la comunidad e incluye goteo de las copas de los árboles (crowndrip).	49
3.7.	Collares o serpentines para estimación de escurrimiento fustal (SF) en el lote 1 (estrato arbóreo -suelo desnudo).	50
3.8.	Disposición de final de 4 de las 7 parcelas experimentales para medición de escorrentía y 1 de 5 canaletas para estimación de precipitación directa en el interior de la asociación con desarrollo de estrato arbóreo.	51
3.9.	Ejercicio de calibración y validación del modelo HEC-HMS con información de la primera tormenta muestreada y su descarga en el AC18.	53
4.1.	Abundancia proporcional de tipos de roca en el Área de Estudio.	56
4.2.	Cambios en la abundancia proporcional de las comunidades antrópicas con mayor superficie en el área de estudio.	67
4.3.	Cambios en la abundancia proporcional de pastizales inducidos y terrenos de uso agrícola en el área de estudio.	68
4.4..	Abundancia proporcional de las distintas comunidades vegetales y su estructura en las AC experimentales	71
4.5.	Diagramas ombrotérmicos y periodicidad de otros eventos registrados en las estaciones cercanas al área de estudio: a) 16096	77

<b>Figura</b>	<b>Índice de figuras</b>	<b>Página</b>
	P. Malpaís. b) 16097 P. Pucuato y c) 16098 P. Sabaneta.	
4.6.	Porcentaje de eventos por rango de precipitación acumulada en 24 hrs. Para efectos del diseño del vertedor, se asume la posibilidad que eventos de tal magnitud ocurran en 1 hr.	78
4.7.	Vertedor construido en la salida de las AC experimental 18 (cálculo de dimensiones y construcción por el autor).	79
4.8.	Rangos de precipitación (mm) y variación de las medias de lámina de escorrentía (mm) en los 7 tratamientos observados.	83
4.9.	Proporción de escorrentía y abstracciones observadas en los siete tratamientos, conforme al total de precipitación acumulada por rangos.	84
4.10.	Modelos de regresión lineal de SF vs. PG (mm) y obtención del parámetro P't para los tratamientos en distintas composiciones de comunidad vegetal.	88
4.11.	Modelos de regresión lineal entre duración de las tormentas y tiempo al pico de la descarga observados y modelados de acuerdo con la propuesta de SCS.	92
4.12.	Hidrogramas de precipitación (hietogramas) y escorrentía de 6 eventos de magnitud inferior a 10 mm en ambas AC.	94
4.13.	Hietogramas e hidrogramas de 4 eventos que se aproximan o rebasan ligeramente los 10 mm de precipitación en ambas AC.	95
4.14.	Esquematación del modelo geométrico del área de estudio, importado al módulo HMS. Las líneas rectas indican la dirección de los flujos de cada subunidad. La base de datos contiene la información hidrológica de las subunidades para los ejercicios de simulación.	98
4.15.	Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 4.8 mm que transcurre en 1.8 horas en el área de estudio, como el evento 84 del 6 de Octubre de 2004.	106
4.16.	Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 5.8 mm que transcurre en 2 horas en el área de estudio, como el evento 54 del 6 de Octubre de 2004.	107
4.17.	Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 7.6 mm que transcurre en 4 horas en el área de estudio, como el evento 42 del 19 de Agosto de 2004.	107
4.18.	Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 10.6 mm que transcurre en 3.2 horas en el área de estudio, como el evento 19 del 27 de Julio de 2004.	108
4.19.	Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 12.4 mm que transcurre en 2.9 horas en el área de estudio, como el evento 65 del 19 de Septiembre de 2004.	108
4.20.	Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 12.7 mm que transcurre en 3.5 horas en el área de estudio, como el evento 91 del 13 de Octubre de 2004.	109
4.21.	Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 42.9 mm que transcurre en 1.5 horas en el área de estudio, como el evento 37 del 7 de Agosto de 2004.	109
4.22.	Interior de la comunidad vegetal en que fue estimada la Intercepción en el presente estudio.	114

## **Listado de Mapas**

(ver archivos electrónicos en CD)

- 01 Mapa Base
- 02 Mapa de Clases de Pendiente
- 03 Mapa de Fallas y Fracturas
- 04 Mapa de Composición en Color
- 05 Mapa de Clases de Índice de Vegetación (año 2000)
- 06 Mapa de Cociente de Circularidad
- 07 Mapa de Densidad de Drenaje
- 08 Mapa de Tiempo de Concentración
- 09 Mapa de Unidades Lito-edafológicas
- 10 Mapa de Áreas de Captación Elegibles
- 11 Mapa de Áreas de Captación Adecuables
- 12 Mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica Convencionales (URHC)
- 13 Mapa de Vegetación y Uso del Suelo del año 1983
- 14 Mapa de Vegetación y Uso del Suelo del año 1994
- 15 Mapa de Vegetación y Uso del Suelo del año 2003
- 16 Asociaciones Vegetales en AC 18 y 30
- 17 Mapa de Escenario Ambiental 1.
- 18 Mapa de Escenario Ambiental 2.

## **Listado de símbolos y abreviaturas empleados en el texto (en orden alfabético)**

- $\alpha$** . (Alfa).- Coeficiente de intercambio de energía entre el dosel y la atmósfera.
- $\Delta L$** .- Cambio de cantidad de agua infiltrada en la subcuenca
- $\Delta S$** .- Cambio de cantidad de agua almacenada en la subcuenca
- a**.- Árbol
- A**.- Superficie del área de captación
- AC**.- Área de Captación (catchment)
- ANP**.- Área Natural Protegida.
- ar**.- Arbusto
- BDG**.- Base de Datos Geográfica
- C**.- Fracción de cobertura de la vegetación
- Cf** .- Clima templado húmedo
- CGSNI**.- Coordinación general del Sistema Nacional de Informática
- cm**.- Centímetro
- CN**.- Número de Curva.
- C.V**.- Coeficiente de variación
- Cw**.- Clima templado subhúmedo
- d.a.p**. Diámetro a la altura del pecho
- d**.-Distancia del vertedor al punto de medición de la altura del nivel de agua en el estanque
- Dd**.- Densidad de drenaje
- DGETNAL**.-Dirección General de Estudios del Territorio Nacional
- DR3M**.- Modelo distribuido de precipitación-escorrentía. (Distributed Routing Rainfall-Runoff Model)
- e**.- Epífita
- e**.- Base de logaritmos naturales (2.7182)
- E**.- Tasa de evaporación
- ET**.- Evapotranspiración actual
- ETM**.- Enhanced Thematic Mapper
- ETM+**.- Enhanced Thematic Mapper Plus
- EUPS (o USLE)**.- ecuación Universal de Perdida de Suelo.
- FESWMS-2DH**.- Finite-element surface-water modeling system for two-dimensional flow in the horizontal plane
- Geo-HMS**.- Módulo de la serie HEC

**H.-** Altura de la columna de agua en el estanque o diferencia de nivel entre el parteaguas y la salida, dependiendo de la expresión.

**h.-** Hierba

**h.-** Duración total del escurrimiento

**hr.-** Hora

**ha.-** hectáreas

**HEC.-** Centro de Ingeniería Hidrológica de la armada de los EEUU (Hydrological Enggeniering Corps)

**HMS.-** Hydrologic Modeling System (Módulo de HEC)

**HSPF.-** Hydrological Simulation Program-Fortran.

**I.-** Intercepción

**INEGI.-** Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

**IRc.-** Valor de reflectancia en la banda correspondiente al infrarrojo cercano de un píxel en una escena satelital

**ITRF92.-** International Terrestrial Referente System 1992

**k.-** Coeficiente de extinción (de la luz)

**km.-** kilómetros

**L.-** Longitud total de canales en el área de captación (o longitud de la corriente, o longitud del vertedor, dependiendo de la expresión)

**Lag.-** Periodo o tiempo de recesión

**LAI.-** Índice de Área Foliar

**Landsat.-** Serie de satelites para el estudio de los recursos terrestres

**ln.-** Logaritmo natural

**lt.-** litros

**m.-** Metros

**mm.-** milímetros

**MCE.-** Multi Criteria Evaluation

**MDT.-** Modelo Digital de Terreno.

**m s.n.m.-** metros sobre el nivel del mar

**n.-** Número de elementos (individuos, tormentas, etc.)

**N.-**Norte (al norte del ecuador)

**NAD27.-** North American Datum 1927.

**NDVI.-** Normalizad Vegetation Index. Índice de Vegetación Normalizado



**OSP.**- Optical Stratification Porosity.- Estratificación de la Porosidad Óptica o simplemente Porosidad óptica del dosel

**p.**- Parásita

**p.**- Profundidad del estanque nivelado

**P'.**- Cantidad de lluvia necesaria para saturar el dosel y troncos

**PCA.**- Principal Components Analysis

**P'G.**- Cantidad de lluvia necesaria para saturar el dosel

**P't.**- Cantidad de lluvia necesaria para saturar tallos y troncos

**Pe.**- Lámina de exceso de precipitación (escurrimiento directo)

**PG (o pp).**- Precipitación (incidente o total del evento)

**POBRCH.**- Positive proportionality of Branches o porcentaje de hábito de las ramas

**PR.**- Percepción Remota

**PRMS.**- Precipitation-Runoff Modeling System, un programa desarrollado por el U.S. Geological Survey

**PS.**- Porcentaje de similitud

**pt.**- Proporción de la precipitación incidente que alcanza los troncos

**Q.**- Escurrimiento

**qp.**- Flujo o gasto al pico de la descarga

**R.**- Tasa media de precipitación

**R.**- Valor de reflectancia de la banda correspondiente al rojo para el mismo píxel en una escena satelital

**R<sup>2</sup>.**- Coeficiente de correlación de Pearson al cuadrado

**Rc.**- Cociente de circularidad

**RH.**- Respuesta Hidrológica

**S.**- Lámina de retención potencial máxima (o Capacidad de almacenamiento de agua en el dosel por intercepción, dependiendo de la expresión)

**s.**- segundos

**S<sub>0</sub> o S<sub>L</sub>.**-Capacidad de almacenamiento de agua en el dosel como función del área foliar del dosel

**SA.**- Stem Area o Superficie de troncos

**S<sub>c</sub>.**- Capacidad de almacenamiento de agua en el dosel como función del área del dosel

**SCS.**- Servicio de Conservación de Suelos de EEUU (Soil Conservation Service)

**SF.**- Flujo caulinar o Escurrimiento Fustal (Stem Flow)

**S<sub>e</sub>**.- Capacidad de almacenamiento de agua en el dosel como función de la cobertura del terreno por el dosel

**SIG**.- Sistema de Información Geográfica

**st**.- Capacidad de almacenamiento de agua en troncos

**SUSHI**.- Sistema de Simulación Silvícola Hidrológica Integral

**SWAT**.-Soil and Water Assessment Tool

**SWMM**.- Storm Water Management Model

**t**.- Trepadora

**t**.- Tiempo (duración de evento)

**tc**.- Tiempo de concentración

**TF**.- Precipitación Directa (Throughfall)

**TIN**.- Red de Triangulación Irregular (Trinagulated Irregular Network).

**Tp**.- Tiempo al pico de la descarga

**Tr**.- Tiempo de retardo

**tr**.- Tiempo de duración de la lluvia efectiva

**UHS**.- Unidad Hidrológicamente Similar

**UPGAM**.- Unweighed Pair Group by Arithmetic Mean

**URH**.- Unidades de Respuesta Hidrológica

**URHC**.- Unidades de Respuesta Hidrológica Convencionales

**URHCP**.- Unidades de Respuesta Hidrológica Convencionales Preliminares

**UTM**.- Universal Transversa de Mercator.

**W**.- Oeste (al oeste del meridiano de Greenwich)

**π**.- Pi.- Valor 3.1416

## I. INTRODUCCIÓN

Las cuencas, son entendidas aquí como las porciones del espacio terrestre limitadas por un parteaguas o divisoria a partir del cual los escurrimientos superficiales derivados de la precipitación son captados y conducidos por una o varias corrientes a una salida o área de drenaje. Pueden incluir en su extensión a un conjunto de recursos naturales que además de sostener una variedad de funciones ecológicas proporciona diversos servicios y bienes básicos a la sociedad, entre los que destaca el suministro de agua. Y así como el agua es un factor sustantivo que influye en la distribución de formas de vida en los ecosistemas, también es un factor de cuya cantidad y calidad dependen diversas actividades del hombre. Por ello, el mantenimiento de la diversidad vegetal y su manejo en cuencas ha sido un tema subrayado en diversos foros nacionales e internacionales desde hace muchos años. Pero particularmente ha sido retomado en la declaratoria de Río de Janeiro en 1992, la conferencia de Lisboa en 1998, la cumbre de Johannesburgo en 2002 y el Foro Mundial del Agua en México en 2006. La protección de cuencas manteniendo su cobertura vegetal con diversidad de especies, heterogéneas en edades y en estructura vertical, activas en acumulación de biomasa y continuas en reproducción, han mostrado mejores resultados en la captación de agua de calidad utilizable para fines económicos en contraste con otros usos del suelo.

La estimación del del balance hídrico, y especialmente el escurrimiento (Q) son sustantivo en este sentido. La observación y registro de Q ha permitido reducir incertidumbre respecto a decisiones de planeación y manejo de recursos naturales relacionados con el agua en cuencas y por tanto de la cantidad, calidad y periodos de detención y retención de humedad.

Con el presente trabajo se pretende desarrollar una estrategia metodológica para estimar experimentalmente la relación entre la estructura de la vegetación y su contribución por interceptación de la lluvia (I) con la Respuesta Hidrológica (RH),

con objeto de obtener información para la calibración y ejecución de un modelo hidrológico sensible a variaciones en las características de la vegetación en términos de capacidad de almacenamiento de agua por el dosel (S).

La combinación del enfoque experimental y de modelamiento hidrológico a partir de la evaluación de la estructura de la vegetación y su respuesta hidrológica específica puede constituir una línea metodológica útil para el apoyo en la toma de decisiones en el manejo de cuencas mediante la generación de escenarios ambientales actuales y potenciales

El objetivo general del presente estudio es identificar descriptores de la estructura de la vegetación relacionados con la Respuesta Hidrológica, y agrupar en este sentido unidades espacio-temporales que puedan ser incorporadas a ejercicios de modelamiento ambiental en el área de estudio, una cuenca hidrográfica forestal del estado de Michoacán.

Tales ejercicios permitirán la generación de diferentes escenarios ambientales de escurrimiento y periodos de retención de humedad en la cuenca, a partir de las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) actuales como con las URH potenciales, tanto en una proyección tendencial de abatimiento de la cobertura vegetal como en un escenario optimista de la restauración y conservación de las porciones de esta cuenca que han sido decretadas como Parque Nacional desde hace más de 70 años.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Generalidades**

Desde el enfoque del estudio de cuencas, la información medida y complementa con información derivada de modelos hidrológicos espacialmente distribuidos, es posible integrar diversas observaciones que tienen efecto en o son afectadas por la dinámica hidrológica en estos espacios (Brooks 1991, López 1994, Schellekens 2000, Randhir et al. 2001 y Cheng et al. 2002). Tanto el enfoque experimental como el enfoque de modelamiento, son herramientas para la comprensión de las respuestas de escurrimiento asociadas con perturbaciones o conversiones entre y dentro de la vegetación y los distintos tipos de usos del suelo. El escurrimiento es uno de los principales parámetros para el modelamiento hidrológico, y es además un indicador sensible de las perturbaciones y/o transformaciones que diferentes usos del suelo tienen en las cuencas (Lørup et al. 1998 , Karnoven et al. 1999 y Hartanto et al. 2003).

### **2.2 La Vegetación y la estructura de la vegetación**

De acuerdo con Cihlar y Jansen (2001) el término Cobertura del Suelo se refiere a la caracterización de los rasgos biofísicos -y por tanto más o menos naturales- del ambiente terrestre, basado en un sistema de clasificación de unidades discretas y formulado para propósitos específicos. En contraste, el término Uso del Suelo, se refiere a la manera en la cual esas unidades biofísicas discretas son usadas por la gente.

La vegetación es en la mayoría de los casos el rasgo de cobertura más natural del medio terrestre y es el resultado de la acción de distintos factores ambientales sobre conjuntos de especies vegetales que cohabitan un espacio determinado. El estudio de su estructura, composición, distribución y de sus cambios en el tiempo, es de utilidad para el conocimiento de su funcionamiento como parte fundamental

de los ecosistemas terrestres, tanto a escala local como global, y resulta indispensable para el mejor manejo de los mismos (modificado de Matteucci y Colma 1982; FGDC 2005).

En el contexto de nuestro país, los primeros intentos de clasificar la vegetación se basaron en rasgos fisonómicos (Sanders 1921, Shelford 1926 y Smith y Johnston 1945 citados por Rzedowski 1978). No obstante, dichos trabajos suelen usar también criterios ambientales (principalmente clima, suelo y relieve) y asentar en su caracterización rasgos de la composición florística.

Además del trabajo pionero de Leopold (1950), han cobrado relevancia por su uso las propuestas de clasificación de Miranda y Hernández X. (1963) y Flores-Mata *et al.* (1971). El sistema de Rzedowski (1978) relaciona su propuesta con otros sistemas de clasificación, justifica ampliamente las categorías empleadas, proporciona un mapa de la distribución de dichas categorías y describe pormenorizadamente los rasgos más sobresalientes del clima y de la composición florística diferencial de sus categorías propuestas en distintas regiones y entidades del país, así como la problemática general representada por escasez de información y/o exploración o deterioro acelerado promovido por las actividades del hombre. Señala también los trabajos y los esquemas clasificatorios conducidos en materia de estudio de la vegetación tanto para el país como para regiones particulares dentro de sus categorías propuestas y destina amplias disertaciones sobre el clima, la fisiografía y las posibles relaciones florísticas, por lo que sin duda se constituye como el trabajo más completo sobre la vegetación de nuestro país.

También han sido de amplia utilidad el sistema de clasificación de uso del suelo y vegetación diseñado y empleado por INEGI (1999), la propuesta de “comunidades” empleadas en el Inventario Nacional Forestal del año 2000 (Palacios-Prieto *et al.* 2000) y la propuesta de González-Medrano (2003) para la unificación de criterios en la clasificación de comunidades vegetales de México.

La estructura de la vegetación o de los tipos de vegetación comprende distintas dimensiones en las que la composición florística se incluye principalmente en la mención de la(s) especie(s) o género(s) dominante(s) y codominante(s) de un tipo de vegetación en diversas propuestas de clasificación generados para nuestro país y eventualmente en la explicitación de los rasgos de composición y de afinidades que conforman a dichas unidades (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Correspondencia aproximada entre los términos nomenclaturales de diferentes sistemas de clasificación de la vegetación de México según diferentes autores.

Rzedowski (1978)	Miranda y Hernández. X (1963)	Flores-Mata et al. (1971)	IG (2000)	González-Medrano (2003)
Bosque tropical perennifolio	Selva alta perennifolia, selva alta o mediana subperennifolia	Selva alta perennifolia, selva mediana subperennifolia (en parte)	Selva perennifolia y subperennifolia	Bosque tropical alto perennifolio
Bosque tropical subcaducifolio	Selva alta o mediana subcaducifolia	Selva mediana subcaducifolia, selva mediana subperennifolia (en parte)	Selva caducifolia y subcaducifolio (en parte)	Bosque tropical medio subperennifolio
Bosque tropical caducifolio	Selva baja caducifolia	Selva baja caducifolia (en parte)	Selva caducifolia y subcaducifolia (en parte)	Bosque tropical bajo caducifolio
Bosque espinoso	Selva baja subperennifolia (en parte), selva baja espinosa perennifolia, selva baja espinosa caducifolia	Selva baja caducifolia (en parte), selva baja subperennifolia, mezquital (en parte)	Mezquital (en parte)	Bosque tropical bajo caducifolio
Pastizal	Pastizales, zacatonales, vegetación de páramos de altura	Pastizal, zacatonal, sabana	Pastizal	Herbazal
Matorral xerófilo	Matorral espinoso con espinas laterales; cardonales, tetecheras, etc.; izotales; nopaleras; matorral espinoso con espinas terminales; matorral inerme parvifolio ; magueyales, lechuguillales, guapillales, etc.; chaparrales, vegetación de desiertos áridos arenosos	Mezquital (en parte), chaparral, matorral submontano, matorral crasicaule, matorral desértico rosetófilo, matorral desértico micrófilo	Mezquital (en parte) Matorral xerófilo	Matorral tropical bajo a alto
Bosque de <i>Quercus</i>	Encinares	Bosque de encino	Bosque de latifoliadas	Bosque templado bajo a medio durifolio
Bosque de coníferas	Pinares, bosque de abetos u oyameles	Bosque de pino, bosque de oyamel	Bosque de coníferas, bosque de coníferas-latifoliadas	Bosques templados medio a alto aciculifolio
Bosque mesófilo de montaña	Selva mediana o baja perennifolia, bosque caducifolio (en parte)	Bosque caducifolio	Bosque mesófilo de montaña	Bosque templado alto aciculi-durifolio
Vegetación acuática y subacuática	Manglar; popal; tulares, carrizales, etc.; bosque caducifolio (en parte)	Manglar, popal	Vegetación hidrófila	Bosques hidrófilos Vegetación hidrófila Matorral hidrohalófilo

### 2.3 Esgurrimento y Unidades de Respuesta Hidrológica

La mayor parte de la precipitación que alcanza una superficie puede derivar en cuatro sentidos. Una parte es tomada por la propia superficie de la vegetación en un proceso conocido como intercepción. Otra parte es absorbida directamente por el suelo mediante un proceso conocido como infiltración. Una parte, denominada almacenamiento en depresiones, es colectada por la superficie del suelo en oquedades y desniveles. El resto es denominado esgurrimento (Marsh 1997).

De acuerdo con Hewlett (1982) y Brooks (1991), la respuesta hidrológica (RH) de una superficie se refiere a la relevancia del flujo de la precipitación producto de una tormenta y representa lo “esgurridiza” que es una superficie de terreno ante las tormentas. Puede estimarse de manera relativa a partir de la velocidad de la descarga ( $m^3/min.$ ) de un evento, analizando la curva resultante (hidrograma) en términos relativos al volumen de la precipitación (Figura 2.1).

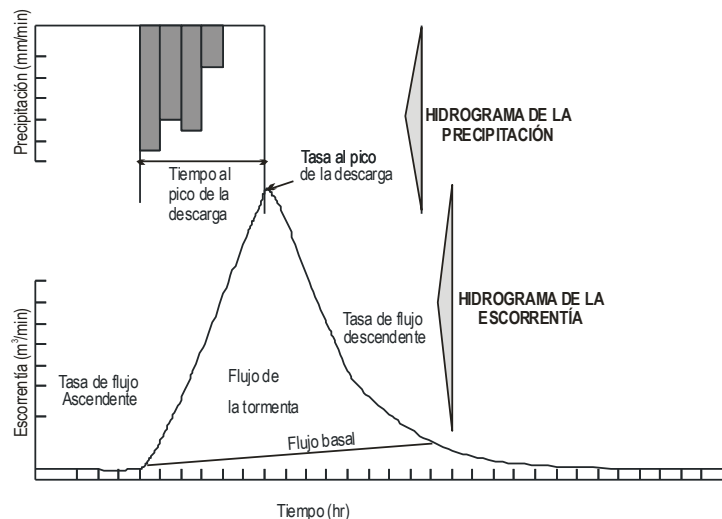


Figura 2.1 Hidrogramas comparativos de la precipitación y el esgurrimento (Adaptado de Chow et al. 1994).

Las gráficas de exceso de precipitación contra el tiempo o hidrograma de exceso de precipitación son un componente clave de las relaciones lluvia-esgurrimento. Las diferencias entre tales hidrogramas son denominadas abstracciones y los



procesos que las componen son la infiltración, el almacenamiento de agua en depresiones de la superficie y la intercepción de la precipitación por la vegetación (Linsley et al. 1988; Brooks et al.1991 y Chow et al. 1994).

La estimación del escurrimiento directo de una cuenca permite aplicar métodos de balance de masa para explicar el balance hídrico del área. Así por ejemplo, la propuesta de Thornthwaite y Mather (1957) retomada por Bruijnzeel (1989) incluye los siguientes conceptos:

$$ET= PG-Q- \Delta S- \Delta L..... (1)$$

donde:

ET= Evapotranspiración actual (mm)

PG= Precipitación (mm)

Q= Escurrimiento (mm)

$\Delta S$ = Cambio de cantidad de agua almacenada en la subcuenca

$\Delta L$ = Cambio de cantidad de agua infiltrada en la subcuenca

Los componentes del ciclo hidrológico en su fase terrestre dentro de una masa vegetal pueden ser analizados en partes de acuerdo al factor correspondiente al suelo, la vegetación, el clima y la topografía de la cuenca.

En las regiones forestales donde la lluvia constituye la principal forma de precipitación, esta puede alcanzar el piso de los bosques ya sea por escurrimiento fustal o por precipitación directa y generalmente es evaporada del suelo en una fracción relativamente insignificante. El agua que escurre puede fluir lateralmente como Flujo Saturado o como Flujo No-Saturado. Complementado con pequeñas cantidades de precipitación directa sobre los mismos canales, la humedad retenida en el suelo puede drenar en la red de corrientes formando un flujo base. El exceso de infiltración puede ocurrir en suelos arcillosos o donde se concentran grandes volúmenes de escurrimiento fustal (Elsenbeer et al. 1992 y Herwitz 1985) (Figura 2.2).

En laderas de pendientes extendidas con suelo de abundantes macroporos u alta conductividad hidráulica en su superficie, el flujo sub-superficial constituye la mayor parte del flujo de la tormenta, mientras que el flujo superficial de saturación domina el hidrograma del flujo de la tormenta donde las laderas son cóncavas, el fondo de los valles es amplio y los suelos son de textura fina (Schellekens 2000).

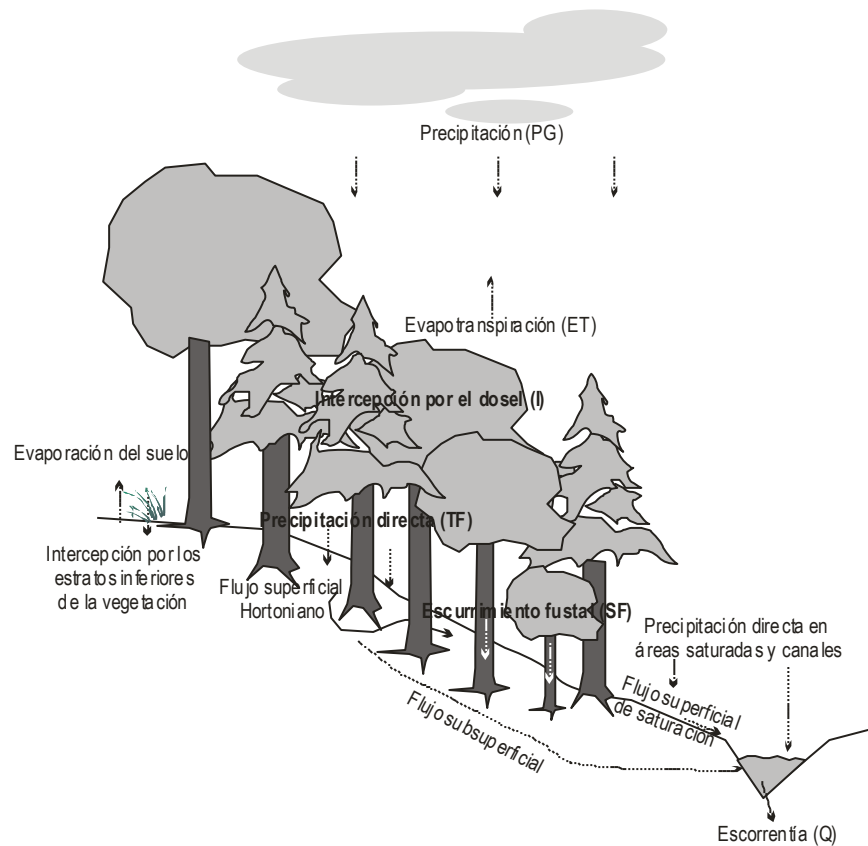


Figura 2.2 Esquematzación de los principales flujos de agua en la fase terrestre del Ciclo Hidrológico en ecosistemas forestales (modificado de Schellekens 2000 y Van Wijk et al. 2001).

Comúnmente las Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), o Unidades Hidrológicamente Similares (UHS), es decir aquellas unidades del terreno que por el conjunto de sus características se supone tienen un comportamiento hidrológico común y por tanto una respuesta también similar, se establece *a priori* mediante la sobreposición cartográfica de las capas temáticas de tipo de roca, tipo de suelo, pendiente y tipo de vegetación o uso del suelo (SCS 1972 citado por Chow et al. 1994, Hay et al. 1993 y Neitsch et al. 2001), existiendo algunos modelos

hidrológicos que fundan la distribución espacial de sus algoritmos en este contexto (como Soil and Water Assessment Tool –SWAT, Neitsch op. cit).

Sin embargo, la red y densidad de drenaje, la presencia de fallas o fracturas y la simetría (también conocida como circularidad) de la cuenca tienen participación significativa en la RH (Rodríguez-Iturbe & Valdés 1979). El modelo SCS o Curva Numérica para estimación de descargas y el método deductivo de Hidrograma Sintético Adimensional propuesto también por el SCS para estimar el valor del pico del hidrograma de descarga, incorporan en sus planteamientos a parámetros como el tiempo de concentración y el tiempo al pico de la descarga. Como regla general, el escurrimiento se incrementa con la pendiente, decrece con el tamaño de partícula y contenido orgánico del suelo, se incrementa con coberturas de materiales como el concreto y el asfalto, y decrece con la cobertura vegetal (Marsh 1997).

#### **2.4 El papel de la vegetación en la fase terrestre del ciclo hidrológico a través de la Intercepción de lluvia.**

En la última década, la literatura sobre la parametrización y el modelamiento del fenómeno de la intercepción de la lluvia por el dosel se ha concentrado en el estudio de ecosistemas tropicales (Carlyle-Moses & Price 1999, Schellekens et al. 1999, Schellekens 2000, Van Dijk & Bruijnzeel 2001 Van Dijk 2000 y Link 2002). Sin embargo, los trabajos pioneros en el tema como los de Horton (1919) y Leonard (1961) (citados por Carlyle-Moses & Price 1999) Penman (1963) (citado por Hewlett 1982) y Helvey y Patric (1965), fueron conducidos principalmente en ecosistemas templados (bosques de coníferas). Pero los principios generales que han regido estas investigaciones tanto para un tipo de condiciones ambientales –y por tanto a un conjunto de cubiertas vegetales- como a otro(as) se sustentan en un mismo enfoque: el denominado Balance de Masa (ver ecuación 1).

El análisis pormenorizado de dicho balance y los debates sobre su particularidades continúa desarrollándose debido a la importancia que representa el conocimiento y estimación de la relación que guardan diferentes superficies vegetadas con las pérdidas o abstracciones del balance por interceptación, ya que tales pérdidas no solo afectan la cantidad de agua de lluvia que llega al suelo, sino también su energía cinética y por tanto su capacidad para desprender y transportar materiales (Linsley et al. 1988, Brooks et al. 1991, Chow et al. 1994, Lørup et al. 1998, Karnoven et al. 1999, Hartanto et al. 2003), además de influir fuertemente en los procesos que afectan la penetración de la luz y por tanto las tasas de fotosíntesis, evaporación y transpiración de los ecosistemas forestales (Knowles et al. y 1999, Turner et al. 2000).

En términos prácticos, la medición y predicción de las pérdidas o abstracciones por interceptación de agua de lluvia en un bosque es un requerimiento esencial en el pronóstico de los efectos de la cubierta vegetal sobre el rendimiento de agua de una cuenca (Cantú-Silva y Okumura 1996, Cantú-Silva y González 2002).

El modelo de Balance de Masa aceptado en lo general para la fase terrestre del ciclo hidrológico, considera que cubiertas vegetales en las que existe desarrollado un dosel y en las que la niebla no constituye una forma sustantiva de la precipitación, existen básicamente tres rutas que puede seguir el agua de lluvia total de un evento (**PG**) para alcanzar el suelo. Estas son, mediante: (1) una pequeña fracción que no toca las hojas o ramas de árboles y arbustos (conocida como “throughfall” o precipitación directa), (2) otra porción también generalmente muy pequeña, que fluye por los tallos de árboles y arbustos (denominada “stemflow” (**SF**) o flujo caulinar o escurrimiento fustal y (3) la fracción de lluvia que golpea el dosel, y que durante y poco después del evento, gotea de la copa y de las hojas de la vegetación (crown drip). En los casos (2) y (3) existe una parte de la lluvia que se evapora y regresa a la atmósfera y por tanto no alcanza el suelo de la comunidad la cual es referida comúnmente como pérdidas totales por interceptación de la lluvia (**I**). Por otro lado, como generalmente no es posible

distinguir entre (1) y (3), ambas fracciones combinadas son generalmente referidas como precipitación directa (**TF**) (Schellekens 2000). El balance hídrico de un dosel húmedo analizado bajo el enfoque de un balance de masa con las anteriores consideraciones conduce al desarrollo de la ecuación 2:

$$PG = TF + SF + I \dots (2)$$

Entre los primeros trabajos que analizaron con detenimiento el problema, destaca el modelo de Horton 1919 (citado por Carlyle-Moses & Price 1999) porque considera que las pérdidas totales por interceptación son una función de la combinación de pérdidas de agua interceptada durante y posteriormente al evento, influidas tanto por las características de la tormenta (su duración), como por las propiedades del dosel (su capacidad de almacenamiento de agua) como se expresa en la ecuación 3:

$$I = \int_0^t E dt + S \dots (3)$$

donde:

t= Duración del evento

S=Capacidad de almacenamiento de agua en el dosel por interceptación

E= Tasa de evaporación del agua interceptada.

Un modelo para explicar los factores influyentes en las pérdidas por interceptación es propuesto por Calder (1977), pero si bien toma en cuenta al dosel de la vegetación, su principal supuesto sugiere que la capacidad de almacenamiento de agua de lluvia por el dosel (**S**) es una función del tamaño de las gotas de lluvia, incrementándose conforme se incrementa el tamaño y volumen de las gotas, por la disminución de su energía cinética asociada.

En ese sentido, los modelos propuestos por Rutter et al. (1971) y más tarde el propuesto por Gash (1979) conocido este último como el modelo analítico,

reconocen la importancia de la cobertura y la arquitectura del dosel, como lo expresa la ecuación 4.

$$I = \sum_{i=1}^n \left[ \int_0^t E dt + \frac{E}{R} (PG - P') \right] + nS \quad \dots (4)$$

donde:

I= Pérdida total por interceptación

t= Duración del evento

n= Número de tormentas que humedecen el dosel

E= Tasa media de evaporación

R= Tasa media de precipitación

PG= Precipitación incidente (total del evento)

P'= Cantidad de lluvia necesaria para saturar el dosel y troncos

S= Capacidad de almacenamiento por Interceptación

El modelo de Gash (1979) incorpora entonces tanto a la ecuación 2 (balance de masa), como la consideración de **I** en función de la capacidad de almacenamiento de agua en el dosel y la tasa de evaporación del agua interceptada propuesta en la ecuación 3, e incorpora un tercer factor, el parámetro **P'**. Este último factor se refiere a una cantidad de magnitud variable dependiendo de la lámina que alcanza y se almacena en dosel y ramas en cada evento en tanto no exista incremento de la biomasa, en contraste con el valor de **S**, que se refiere a un parámetro de magnitud más o menos constante en función de las características del dosel y de las tormentas de acuerdo al modelo de Gash.

El parámetro **P'** puede ser calculado en dos partes: la correspondiente propiamente al dosel (**P'G**) (ecuación 5) y la correspondiente a tronco y ramas (**P't**) (ecuación 6):

$$P' = P'G + P't$$

donde:

$$P'G = -\left(\frac{R}{E}\right)S \ln\left(1 - \frac{E}{R(1-TF-SF)}\right) \quad (5)$$

TF y SF han sido planteados en la ecuación (2) y R, E y S en la ecuación (4) y

$$P't = \frac{st}{pt} \dots (6)$$

donde:

st= la capacidad de almacenamiento de agua en troncos y

pt= proporción de la precipitación incidente que alcanza los troncos

pt y st se pueden asumir como la pendiente y la ordenada al origen – respectivamente- de la relación de regresión de la cantidad de escurrimiento fustal contra precipitación incidente.

De acuerdo con Carlyle-Moses y Price (1999) el modelo analítico ha mostrado buen desempeño en la estimación de la interceptación de diversas comunidades vegetales en el mundo, es relativamente sencillo y requiere de pocos datos para su aplicación, ya que **PG**, **R**, **TF** y **SF** pueden ser estimados directamente a partir de la instrumentación y monitoreo de lotes e individuos arbóreos y arbustivos en campo, mientras que otros parámetros pueden ser calculados. Como **E**, que equivale a la pendiente de la regresión entre la interceptación observada contra **PG** multiplicada por **R**. Y **P'** que puede calcularse como lo consignan las expresiones 5 y 6.

Invariablemente, el modelo de Gash requiere del conocimiento o la derivación de parámetros del dosel que permitan una estimación de su capacidad de almacenamiento (**S**). Así, una propuesta muy detallada de los factores que afectan **I** fue presentada por Rutter (1971) quien asume que el parámetro **S** es una función de las características de las hojas y que puede calcularse mediante coeficientes empíricos. Sin embargo, en el modelo analítico, el parámetro **S** es definido como

la cantidad de agua que permanece en un dosel saturado en condiciones de cero evaporación y por tanto en función fundamentalmente de las características del dosel y en menor proporción de las características de las tormentas, rasgo que en su primera versión (Gash 1979) no explicitó. En contraste, Calder (1977) explícitamente señala a **S** como función dependiente de la intensidad de la lluvia.

Los supuestos del modelo revisado de Gash et al. (1995) son que **S**, el cociente **E/R** y los parámetros **P'G** y **P't** pueden ser tratados como funciones del índice de área foliar (**LAI**). Este parámetro incorporado en el debate es un descriptor de la densidad de la vegetación y es definido como la suma de la superficie saludable de un lado de las hojas por unidad de área (Watson 1947 citado por Van Dijk & Bruijnzeel 2001), el cual a su vez está estrechamente relacionado con la fracción de cobertura de la vegetación (**C**) por su capacidad para atenuar la penetración de la radiación de una longitud de onda y puede ser expresa conforme la ecuación de Beer-Lambert (Turner et al., 2000) (ecuación 7):

$$C = 1 - e^{-kLAI} \dots (7)$$

donde **k** es el llamado coeficiente de extinción, el cual depende de la distribución de hojas y su ángulo de inclinación y asume valores que van de 0.6 a 0.8 en comunidades arboladas (según Ross 1975 citado por Van Dijk 2002 ).

Sin embargo, el modelo revisado de Gash asume que la capacidad de almacenamiento del dosel (**S**) estaría relacionado linealmente con la fracción de cobertura del mismo dosel (**C**) (conforme la ecuación 20) lo cual implicaría que **S** decrece exponencialmente ante incrementos del índice de área foliar (**LAI**), siendo más lógico suponer que **S** se relacione linealmente con **LAI** más que con **C** como lo asienta la ecuación (8):

$$S = S_L LAI \dots (8)$$



donde  $S_L$  denota el almacenamiento específico de agua en hojas de una especie particular y puede determinarse experimentalmente en laboratorio.

Es un hecho que las propiedades de retención de agua por el dosel pueden cambiar por (1) la densidad y/o cobertura de la vegetación, (2) la inclinación de las hojas conforme estas crecen y envejecen (3) el arreglo y hábito particular del follaje que varía entre y dentro de los individuos (ya que las hojas pueden ser más verticales y menos susceptibles de humedecer o presentar hábitos caedizos en una época del año) y (4) el incremento de densidad de hojas, que provoca que estas se toquen haciendo imposible una saturación completa de todo el dosel. En un caso extremo (hipotético) el efecto de acolchado del follaje se haría tan importante que **S** se incrementaría linealmente conforme se incrementa **C** más que **LAI**. Y del mismo modo, en condiciones de baja a moderada **LAI**, sería difícil asumir la relación lineal expresada en la ecuación 7.

Por otra parte, aunque actualmente no existen evidencias de cómo las tasas relativas de evaporación (**E**) están relacionadas con las características del dosel, las revisiones al modelo de Gash y la propuesta de Van Dijk (2002) se orientan a considerar en el primer caso la linealidad de la relación de **S** con **C** (como en la ecuación 8) o con **C** a través de **LAI** en la segunda propuesta, como se señala en la ecuación 9.

$$E = aE_a = (1 - e^{-\alpha LAI}) E_a \dots (9)$$

donde se observa que **a** es una función de **LAI** y  $\alpha$  (equivalente a **C** en la ecuación de Beer-Lambert), mientras que **E<sub>a</sub>** es referido como coeficiente de intercambio de energía entre el dosel y la atmósfera.

Por otro lado, Van Dijk y Bruijnzeel (2001) y Van Dijk (2002) reconocen que el modelo analítico revisado y su adaptación no consideran en la estimación de **E** a

algunos factores de la morfología de los individuos arbóreos que afectan la capacidad de retención de agua por los mismos.

Por tanto, el almacenamiento de agua en hojas, troncos y ramas es diferencial dada una composición específica del dosel y debida muy probablemente a la rugosidad de las cortezas y en general a las distintas magnitudes de las superficies vegetales de las especies y los individuos, por lo que sugieren debiera incorporarse una corrección en la evaluación de **E** más como función de las características y cantidades de superficie en el dosel, que de la capacidad de almacenamiento (**S**).

La cobertura del dosel (**C**) mencionada con anterioridad, cobra singular importancia en el análisis del fenómeno de intercepción, se refiere a la proporción del piso del bosque cubierta por la proyección vertical de la copa del conjunto de los árboles. Muchas otras definiciones aparecen en la literatura relacionadas con el anterior concepto. Muestreos al dosel de la comunidad vegetal mediante análisis digital de fotografías verticales permiten inferir estratificación de la porosidad óptica del dosel (**OSP**) la cual es considerada un tipo de atributo estructural vertical del bosque, ya que su valor en la posición mas interior de la comunidad es similar a **C** (Zhu et al. 2003).

Por otro lado, de acuerdo con Barclay (1998) citado por Scurlock et al. (2001), existen al menos 4 maneras comunes de medir **LAI**, las cuales reflejan diferentes propósitos para su determinación. Las metodologías para la estimación de **LAI** incluyen: A) colecta destructiva y determinación directa total usando un sistema óptico automatizado o manual. B) colecta y pesado de todas las hojas del suelo obteniendo luego por una relación área/masa L a partir de submuestras (aplicable en especies caducifolias), C) relaciones alométricas basadas en las dimensiones físicas del individuo tales como el diámetro a la altura del pecho (d.a.p) y relaciones definidas para especies particulares con base en medidas destructivas previas (Turner et al. 2000), D) métodos indirectos de contacto tales como

intersección vertical y puntos en cuadrantes inclinados y E) métodos indirectos sin contacto entre los que se incluye a la percepción remota y el análisis de fotografías verticales (Carlson y Ripley 1997, Fasnach et al. 1997, Knowles et al. 1999, Brown et al 2000 y Zhu et al. 2003).

El parámetro POSBRCH (porcentaje de hábito de las ramas) es obtenido por la proporción del número total de ramas del individuo clasificadas como positivas por interceptar con pendiente positiva a la vertical hipotética del fuste, asumiendo a esta como el eje “y” de un plano cartesiano (Steinbuck 2002).

El parámetro SA (superficie del tronco) puede también ser estimado de manera directa por métodos destructivos o mediante técnicas indirectas como las empleadas convencionalmente en el ámbito forestal como la medición de alturas de los individuos arbóreos o una submuestra de ellos y sus respectivos d.a.p., lo que permite una estimación muy precisa al menos de las dimensiones del fuste para una aproximación de **SA**. La altura total de los individuos es calculada mediante la transformación trigonométrica del dato de inclinación observada desde la altura a la base del fuste a la altura total del individuo (o su diferencia) a una distancia conocida de éste, proporcionada por un clinómetro y el diámetro a la altura del pecho de los individuos se obtiene con el uso de forcípulas graduadas o de cintas diamétricas o de cintas métricas. Y en el gabinete, la información obtenida por especie y por individuos puede tratarse mediante análisis de regresión exponencial que se ajusten a las dimensiones en este caso de la superficie de los fustes (Amador et al. 2002).

Link (2002) señala la necesidad de mejorar el modelo analítico y sus adaptaciones, considerando en la determinación de **S** de doseles complejos la intervención de las tasas diferenciales de secado de tallos por la rugosidad de su corteza y la presencia de epífitas.

En este sentido, aun cuando el rango de variación del grosor de corteza estudiados por Steinbuck (2002) comprendió de 0.1 a 9 cm, una proporción significativa de la variancia observada en **SF** por dicho parámetro (grosor de corteza) no fue explicada, debe considerarse que dicho trabajo se centra en especies de coníferas con troncos de conformación monopódica y ramas -en gran proporción- excurrentes en tanto que la conformación del tronco de muchas otras especies es fundamentalmente simpódica y el hábito de sus ramas es principalmente decurrente, lo que puede llegar a constituir un factor sustantivo en las variaciones en **I** por las contribuciones de **SF** en comunidades compuestas con especies distintas a las coníferas.

Por otro lado, considerando la variabilidad espacial y temporal de las características de la precipitación que influyen en **I**, distintos supuestos son presentadas por Zeng et al. (2000) –todos ellos teóricamente válidos-en el sentido de establecer diferenciaciones sobre las que puede descansar la estimación de **S** tratándose como función del:

- a) área del dosel (**S<sub>C</sub>**)
- b) área del terreno (**S<sub>G</sub>**) y
- c) área foliar (**S<sub>0</sub>**)

Las relaciones entre al menos dos de estos supuestos pueden establecerse mediante las ecuaciones (10 y 11) y la Figura 2.3:

$$\mathbf{S_G} = \mathbf{S_0 L} \quad \dots (10)$$

$$\mathbf{S_C} = \mathbf{S_G / C} \quad \dots (11)$$

Lo anterior subraya la importancia de la estimación de los parámetros **C** y **L** en orden de evitar el cálculo de **S** como promedio de su valor en áreas densamente vegetadas y áreas desprovistas de cobertura. Además, como lo plantea Zeng et al. 2000, **I** puede ser considerada función de aspectos de estocacidad de la

precipitación e influir en  $S$ , pero no necesariamente a través de su intensidad sino mediante:

- El tiempo promedio entre un evento y otro
- La duración promedio del evento y
- El tiempo de secado del dosel.

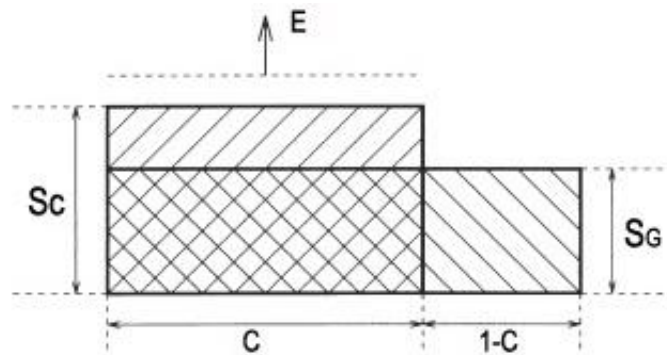


Figura 2.3. Esquema de la relación entre la capacidad de almacenamiento de agua por área de dosel ( $S_C$ ) y capacidad de almacenamiento de agua por el dosel por área del terreno ( $S_G$ ), cuando el dosel no cubre en un 100% el terreno (de acuerdo con Zeng et al. 2000).  $C$  es la fracción de cobertura del terreno por el dosel y  $E$  la evaporación del agua interceptada que ocurre en las áreas vegetadas.

Aspectos que aun no han sido incorporados en las adaptaciones al modelo analítico y que permitirían omitir algunos supuestos del mismo en el sentido de considerar a las tormentas como unidades discretas entre las cuales el dosel se seca por completo.

A la luz del acuerdo general sobre el esquema conceptual del balance de masa y del estado actual de discernimiento del modelo analítico que se profundiza, y en tanto se desarrolla el debate iniciado por Calder (1977), refutado por Zeng et al. (2000) e intensificado recientemente por Price y Carlyle-Moses (2003) y Keim (2004) en cuanto a que  $S$  (capacidad de almacenamiento de agua por el dosel) está o no en función de la intensidad de la lluvia, puede concluirse que los principales parámetros del dosel, de bosques con composición heterogénea de

especies, que permitirían modelar las abstracciones por interceptación, son aquellos orientados al cálculo tanto del parámetro **S**, como de **P'G** (la cantidad de lluvia necesaria para saturar el dosel) y **P't**, (cantidad de lluvia necesaria para saturar ramas y tallos), así como aquellos parámetros que han explicado las variaciones inter e intraespecíficas en **SF** (escurrimiento fustal) y que en síntesis son:

- **C** (La fracción de la cobertura del dosel expresada en porcentaje de cobertura del terreno)
- **LAI** ( El Índice de área foliar expresado en  $m^2/m^2$  )
- **POSBRCH** (La proporción de hábito de ramas expresado como porcentaje del total de las mismas)
- **SA** (La superficie o área de tallos y ramas en  $m^2$ )

Los parámetros **PG** (precipitación total o incidente) **SF** (escurrimiento fustal) y **TF** (precipitación directa o throughfall) aunque no corresponden propiamente a rasgos del dosel, son sustantivos para el balance de masa conforme a la ecuación **2** y particularmente lo son para la derivación de los parámetros **S** y **P'**.

## 2.5 Vegetación y Percepción Remota

La Percepción Remota (PR), es decir la adquisición, mediante sensores transportados en naves aéreas o espaciales, de datos concernientes a la radiación electromagnética que es reflejada o emitida por la superficie de la tierra en diversas propiedades y longitudes de onda (Hardy 1981), es actualmente una de las herramientas más poderosas y flexibles para estudios del ambiente y de los recursos naturales. Por ello el desarrollo de los diversos sensores existentes (Figura 2.4) ha mantenido la ocupación de numerosos investigadores en las últimas décadas.

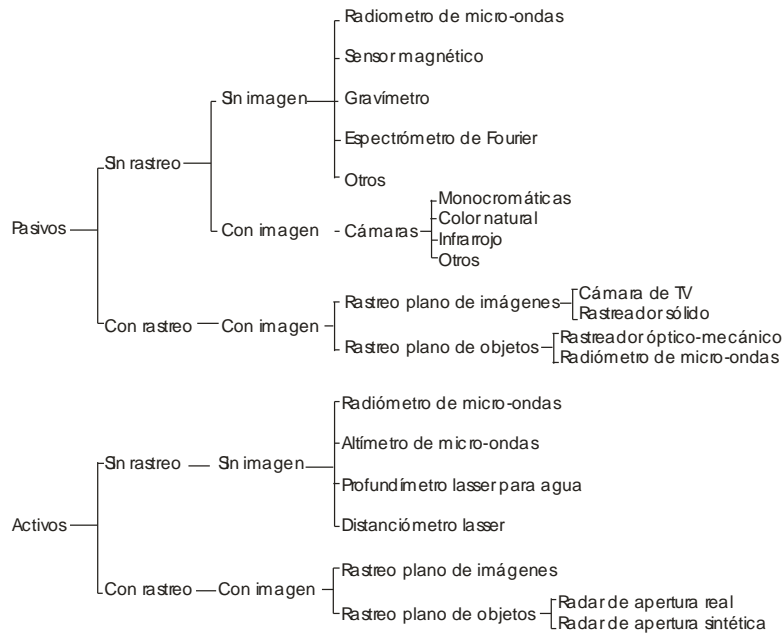


Figura 2.4. Diversidad y clasificación de sensores remotos (Modificado de <http://rst.gsfc.nasa.gov/>).

Desde los primeros lanzamientos de la serie Landsat la precisión en la calidad de la información proveniente de dichos sensores es utilizable en la clasificación de la cobertura y vegetación de la superficie de la tierra y ha venido desarrollándose a través de numerosas técnicas que básicamente podrían incluirse en uno de los siguientes dos grupos: (1) la técnicas de restauración de la información (y que eventualmente incorporan datos “adicionales” o “colaterales” del ambiente) y (2) las técnicas de procesamiento digital que mejoran las imágenes basadas en patrones diferenciales de reflectancia (Fahsi et al 2000).

Derivado de lo anterior, los principales aspectos de la estructura de la vegetación identificables mediante técnicas de percepción remota se han referido comúnmente a: (1) variables continuas (abundancia o importancia de una especie) y (2) variables categóricas (tipo de vegetación y presencia o ausencia de una especie) (Franklin 1995).

No obstante, los Índices de Vegetación sigue siendo una herramienta aplicable al reconocimiento de variables continuas y categóricas relacionadas con la

vegetación. El Índice de Vegetación Normalizado (NDVI por sus siglas en inglés) es una de las transformaciones más sencillas y más comúnmente empleadas en las inspecciones preliminares de la vegetación mediante procesamiento digital de imágenes satelitales (ecuación 12) (Derring y Haas 1980; Lyon y McCarthy 1995 y Jensen 1996 citados por Senay y Elliot 2000).

$$\text{NDVI} = \frac{IRc - R}{IRc + R} \quad (12)$$

donde:

IRc= valor de reflectancia en la banda correspondiente al infrarrojo cercano de un píxel.

R= valor de reflectancia de la banda correspondiente al rojo para el mismo píxel.

## 2.6 Vegetación y modelamiento hidrológico

Tradicionalmente, los hidrólogos forestales han confiado en la experimentación con cuencas apareadas para evaluar los efectos que las perturbaciones o transformaciones al uso del suelo tienen en las modificaciones a la evapotranspiración del bosque, y por tanto, a la cantidad de agua retenida en la cuenca (Figura 2.5). Para el propósito de tales experimentos el escurrimiento anual es medida en ambas cuencas (Qa y Qb), primero usando los datos de un periodo denominado de “calibración”, cuando sus respectivas cubiertas vegetales son las mismas. Luego se ajusta una ecuación de regresión para calcular el escurrimiento esperada en la cuenca “A” ( $Qa_{\text{calc}}$ ).

El modelo generado, es empleado para determinar la diferencia entre la Qa observada durante el periodo denominado de “tratamiento”, cuando la cubierta forestal ha sido retirada o perturbada y la  $Qa_{\text{calc}}$ . La diferencia de escurrimiento de la cuenca “A” es atribuible al tratamiento efectuado y se asume que en términos de balance hídrico corresponde a la diferencia de evapotranspiración, atribuible también al tratamiento.



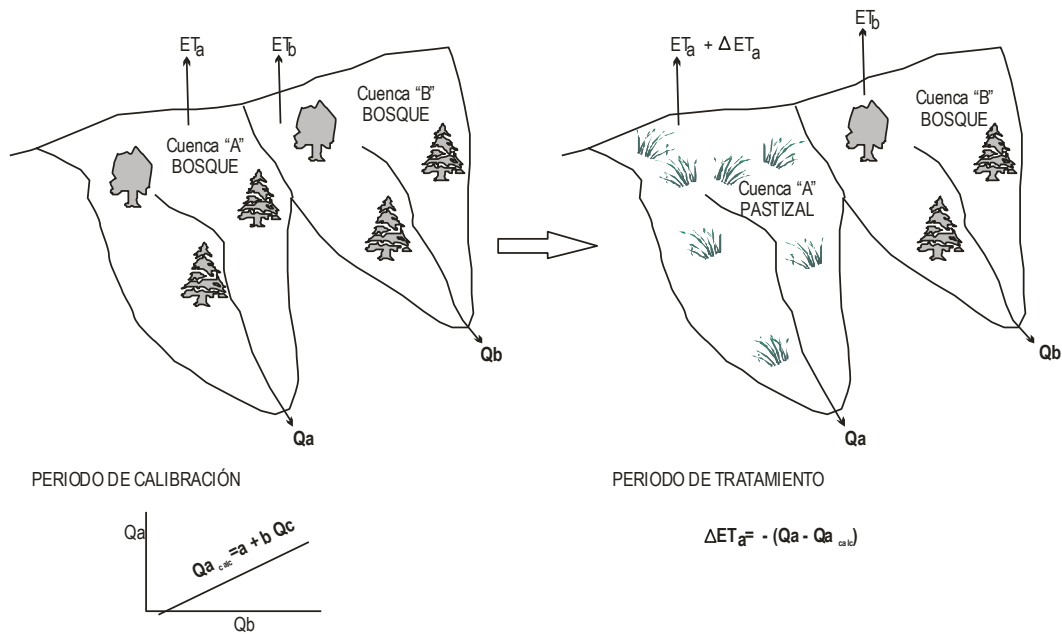


Figura 2.5. Esquematación del procedimiento experimental convencional en cuencas apareadas para determinar el efecto sobre el balance hídrico de la conversión de uso de suelo (adaptado de Hewlett 1982).

Durante los últimos 20 años se han desarrollado avances en el modelamiento de procesos hidrológicos (forestales) en un amplio rango de escalas espaciales y temporales. De este modo, los modelos hidrológicos espacialmente distribuidos y basados físicamente representan una alternativa predictiva del comportamiento del agua en cuencas y de sus respuestas a diferentes usos y manejos. Una característica de estos modelos es su capacidad para distribuir parámetros y relaciones entre parámetros dentro de las cuencas.

Con objeto de evaluar, proyectar y modelar las diferentes condiciones bióticas y abióticas de espacios geográficos como las cuencas, la relativamente reciente inclusión de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la percepción Remota (PR) y los Modelos Hidrológicos en las ciencias ambientales, han contribuido con nuevas posibilidades de análisis, constituyéndose como un conjunto de herramientas que han mostrado éxito en la comprensión de diversos procesos a diferentes escalas espacio-temporales (Maidment 1993).

De acuerdo con Mendoza (2002), algunos criterios geomorfológicos como la pendiente y los atributos del suelo han permitido definir unidades con respuesta hidrológicas similares, las que a su vez han permitido la formulación y construcción de modelos hidrológicos cuya ejecución requiere un limitado número de mediciones. El modelamiento hidrológico con bases físicas y espacialmente distribuido representa entonces una alternativa para entender el comportamiento hidrológico de regiones pobremente aforadas. Y dicho conocimiento permite la planeación del manejo y la conservación en cuencas, así como la identificación de prioridades de restauración de áreas comprendidas en ellas.

El modelo *Soil and Water Assessment Tool*<sup>1</sup> que es de bases físicas, permite por un lado subdividir las cuencas en cientos o miles de unidades espaciales y por otro, modelar en lapsos continuos de tiempo el comportamiento de impactos de largo plazo como la sedimentación de embalses en 50-100 años o el impacto de prácticas agrícolas anuales (Neitsch et al. 2001). En su disertación doctoral -que deriva en la propuesta de un Sistema de Simulación Silvícola Hidrológica Integral-<sup>2</sup> Olaya (2002) refiere entre los modelos hidrológicos precursores más importantes a su modelo a los siguientes: La serie HEC<sup>3</sup> de aplicación en análisis hidrológico de inundaciones; DR3M<sup>4</sup>, un modelo distribuido de precipitación-escorrentía; FESWMS-2DH<sup>5</sup> un sistema de modelamiento de aguas superficiales mediante elementos finitos; PRMS<sup>6</sup>, otro sistema para la modelamiento de la relación precipitación-escorrentía; SWMM<sup>7</sup>, un modelo para análisis de tormentas y HSPF<sup>8</sup>, un programa muy completo de simulación hidrológica.

Un modelo más comprensible, refiere Schellekens (2000), es TOPOG que integra balances de sedimentos, solutos, carbono y agua de pequeñas cuencas (< 10 km<sup>2</sup>) y

---

<sup>1</sup>SWAT por sus siglas en inglés

<sup>2</sup>SUSHI por sus siglas en español

<sup>3</sup>Por sus siglas en inglés del Centro de Ingeniería Hidrológica de la armada de los EEUU.

<sup>4</sup>Por sus siglas en inglés de: Distributed Routing Rainfall-Runoff Model, un programa desarrollado por el U.S. Geological Survey

<sup>5</sup>Por sus siglas en inglés de: Finite-element surface-water modeling system for two-dimensional flow in the horizontal plane, desarrollado por la administración Federal de carreteras de los EEUU.

<sup>6</sup>Por sus siglas en inglés de: Precipitation-Runoff Modeling System, un programa desarrollado por el U.S. Geological Survey.

<sup>7</sup> Por sus siglas en inglés de: Storm Water Management Model

<sup>8</sup>Por sus siglas en inglés de: Hydrological Simulation Program-Fortran, desarrollado por la agencia de protección ambiental de los EEUU.

es particularmente sensible para explorar mecanismos complejos de retroalimentación como el que se da en el balance hídrico y la configuración de diferentes arreglos arbóreos en condiciones subhúmedas, incluyendo simulaciones exitosas con cambios en el crecimiento de los árboles y el escurrimiento en periodos hasta de 20 años. TOPOG es especialmente sensible a variaciones de la vegetación, a la conductividad hidráulica de suelos y a la capacidad de intercepción del dosel.

El modelo HEC-HMS (Hydrologic Modeling System 3.0.1) requiere de tres componentes para su calibración: un modelo meteorológico que puede estructurarse con información de diversa índole temporal (anual, mensual, semanal, hasta cada 1 minuto); un modelo de las características físicas e hidrológicas de las cuencas (para lo cual HEC ha desarrollado un modulo a manera de extensión del SIG ArcView, que deriva dichas características a partir del análisis de un Modelo Digital de Terreno (MDT) y un denominado “manejador de las especificaciones de control” que fundamentalmente organiza los periodos de simulación en que es ejecutado el modelo. Las fuentes de datos con las que se calibra el modelo tambien son variables y comprenden desde datos agrupados en series de tiempo (precipitación, escurrimiento, evaporación etc.), datos “pareados”, es decir provenientes de tormentas y/o cuencas con características similares y datos provenientes de información en formato raster. Además, HEC incorpora multiples rutinas que permiten la simulación de Respuesta Hidrológica (RH) conforme a distintos criterios entre los que destacan el método del hidrograma unitario adimensional y el modelo del SCS, entre muchos otros. Finalmente, HEC, cuenta dos módulos adicionales de gran utilidad, uno para generar las capas en formato raster (HEC-GeoHMS) que pueden incorporarse en la espacialización de escenarios en el módulo HMS y un “manejador de juicios” que prueba la eficiencia de las ejecuciones de las simulaciones y sugieren los parámetros que pueden optimizar una salida mas adecuada del modelo.

En campo, las variables requeridas para la parametrización, calibración y ejecución de los modelos pueden provenir de estaciones hidrométricas, o de dispositivos experimentales, como los lotes de escurrimiento o aforos en el cauce de salida de las cuencas, y pueden ser diseñados para medir la cantidad de agua escurrida en cada evento de precipitación. Los datos de las descargas son probablemente la información más importante que se requiere para el manejo de recursos hídricos (Brooks et al. 1991).

El escurrimiento en una cuenca puede ser medido directamente en campo o bien puede calcularse a partir de información levantada en lotes o parcelas de escurrimiento y/o experimentos de simulación de lluvia. Los lotes de escurrimiento pueden variar en tamaño desde pequeños (1 a 2 m<sup>2</sup>), parcelas de 2 m x 22 m que corresponde a 0.01 acres (0.004 ha) usadas en la configuración de la EUPS o USLE (Wischmeier y Smith, 1978) hasta lotes de 25 m de largo y 4 m de ancho. En todos los casos, se construye en su entorno una pared a manera de frontera del lote, que puede ser de plástico, concreto u otro material y se inserta a por lo menos 10 cm en el suelo. Se dispone entonces un tanque instrumentado al final del lote que permita medir volúmenes de sedimentos y agua en cada evento de precipitación (Mutchler et al. 1994 y Hartano et al. 2003).

Tanto en lotes de escurrimiento como en cuencas de diversas dimensiones, el empleo de vertedores es uno de los mejores procedimientos para efectuar aforos de caudales. Por ejemplo en la investigación forestal conducida por Zirlewagen & Wilpert (2001) fueron empleados vertedores de forma triangular (60° Thomson Weir) mientras que en investigaciones agrícolas son más comúnmente empleados los vertedores de sección rectangular. Estos últimos son los más antiguamente empleados y los de más fácil construcción (Smajstrala and Harrison 1981).

Más de una docena de modelos han sido desarrollados para calcular el gasto en vertedores rectangulares sin contracciones laterales del chorro, entre los que

destacan por su aplicación para gastos de magnitud pequeña de acuerdo con Arteaga et al. (2001) y Smajstrala & Harrison (1981) (ver Apéndice 1).

El modelamiento hidrológico ha sido exitoso en la parametrización de factores que varían en el tiempo. Sin embargo la fragmentación espacial de las áreas que manejan son muy simples. En muchos casos los modelos asumen propiedades espaciales uniformes o solo permiten un pequeño número de subunidades espaciales. Los SIG ofrecen el potencial de incrementar el grado de definición de las subunidades, en número y en detalle descriptivo. La fusión entre SIG y Modelos Hidrológicos ofrecen también el potencial de ubicar procesos a escalas diversas (Steyaert 1993).

El manejo de la escala para el modelamiento hidrológico es un problema de formulación conceptual del problema tratado (Bergström y Graham 1998). Debido por ejemplo a la gran variabilidad en la estructura de la vegetación y la precipitación, sería poco realista considerar estimaciones puntuales de intercepción y escurrimiento para un modelamiento a meso o macroescala. Sin embargo, como lo apunta Bergström y Graham (op. Cit):

*“no hay razón para paralizarse ante la magnitud de los problemas de modelamiento hidrológico en macroescalas”*

ya que un enfoque estadístico que considere la variabilidad de los parámetros ha probado ser más útil que experimentos intensivos a diferentes escalas.

Así, Zirlewagen y Wilpert (2001) estudiaron mediante lotes de escurrimiento de 1 a 2 m<sup>2</sup> y el aforo a una cuenca experimental de 9.3 ha, los flujos de agua, sedimentos y nutrientes, recomendando (1) dividir las cuencas experimentales en unidades estructurales representativas, (2) modelando la información proveniente de dichos unidades de manera separada y (3) ponderando los resultados de conjunto en ejercicios de simulación.

Hartano et al (2003) evaluaron los factores que afectan el escurrimiento y las tasas de erosión monitoreando a nivel de lotes (2 x 15 m) distintas condiciones de cobertura en bosques de Indonesia, recomendando el uso de lotes de escurrimiento para esclarecer los vínculos causa-efecto entre intervenciones e impactos derivados de prácticas y estrategias de manejo en bosques.

Mediante el aforo de un rodal de 2.5 ha de abeto Douglas, Van Wijk et al. (2001) evaluaron y modelaron el gasto y consumo de agua y carbono del ecosistema forestal usando datos meteorológicos puntuales de solo 10 años de continuidad y un modelo espacialmente distribuido.

Lørup et al. (1998) identificaron y evaluaron impactos del cambio de uso de suelo en Zimbabwe basandose en series hidrometeorológicas de 25 a 50 años en cuencas experimentales de 200 a 1,000 km<sup>2</sup> calibrando y ejecutando un modelo espacialmente distribuido. Dichos autores recomiendan probar estadísticamente la ejecución del modelo a partir de los siguientes criterios: (1) balance hídrico de conjunto (2) Desempeño del coeficiente de eficiencia basado en datos mensuales. Concluyen que el modelamiento hidrológico y las pruebas estadísticas tradicionales mejoran enormemente la capacidad de evaluar impactos en las tasas de escurrimiento derivados del cambio de uso del suelo, en contraste con utilizar solo uno de las dos estrategias.

Karnoven et al (1999) subdividieron una cuenca de 1,290 km<sup>2</sup> asumiendo un concepto equivalente al de Unidad de Respuesta Hidrológica: el de Unidad Hidrologicamente Similar (UHS), para simular tasas de escurrimiento mediante el análisis de la respuesta de hidrogramas que permiten simplificar la caracterización-descripción de interacciones con respuestas no-lineales de diferentes componentes de las subcuencas asociadas con diferentes usos de suelo.

## **2.7 Relevancia del presente trabajo en el contexto del modelamiento ambiental.**

El modelamiento conceptual y predictivo del balance hídrico para cuencas forestales permite estimar magnitudes de entradas y salidas de agua en la fase terrestre del ciclo hidrológico pero sobre todo conduce a identificar problemáticas asociadas con: (1) la cantidad de agua de lluvia que llega al suelo y (2) su energía cinética y por tanto con su capacidad para desprender y transportar materiales hacia embalses o cuerpos de agua comprendidos en el sistema de estudio (Linsley et al. 1988, Brooks et al.1991, Chow et al. 1994, Lørup et al. 1998, Karnoven et al. 1999, Hartanto et al. 2003).

La síntesis utilitaria de la relación del enfoque metodológico y los resultados del presente trabajo tienen que ver con el conjunto de beneficios y/o perjuicios que la condición de la cuenca y sus cuerpos y corrientes de agua tendrían como producto de un adecuado o inadecuado balance hídrico (en magnitud y en temporalidad) y con el desarrollo de soluciones para el manejo de la estructura de la vegetación que represente soluciones a la problemática derivada.

Una de las metas actuales en el modelamiento hidrológico es la evaluación de los efectos de los cambios de uso y cobertura del suelo sobre los recursos hídricos, ya que estos cambios son el resultado de procesos naturales y de procesos de influencia antropogénica que incluyen e influyen sobre aspectos medioambientales como la dinámica de la vegetación, erosión, acidificación, salinización, sobrepastoreo, desertificación, desarrollo urbano e industrial, expansión agrícola y deforestación (Bowling y Strzepek 1997).

Destaca en este sentido el escaso conocimiento que existe para nuestro país en materia de cantidad y calidad de agua y más aun de sus aspectos ecológicos asociados. Fulton y West (2001) señalan que los efectos de las modificaciones a la estructura de la vegetación principalmente sobre la **cantidad** de agua en la salida de las cuencas, la velocidad relativa de los flujos (respuesta hidrológica), el

movimiento de sedimentos, nutrientes, ácidos y sales así como la temperatura del agua en canales y el oxígeno disuelto, y por tanto sobre la **calidad** del agua involucrada, pueden llegar a constituir fuentes potenciales de contaminación de corrientes de drenaje y cuerpos de agua en las cuencas. Resulta entonces importante tomar en consideración estos aspectos en aquellas cuencas ubicadas en condiciones de pendientes elevadas, suelos erosionables y sujetas a considerables láminas de precipitación. Los efectos adversos derivados en este sentido debido a manejo inapropiado de la vegetación que conduce a estas modificaciones en la cantidad y calidad del agua sobre los aspectos abióticos y bióticos de corrientes y cuerpos de agua y que en un escenario extraordinario pueden llegar a la deformación-inestabilización-desaparición de canales o la eutrofización de lagos y cuerpos de agua, pueden ser evaluados, prevenidos y en un momento dado incluso revertidos si se toman en cuenta prácticas adecuadas de diagnóstico, planeación y manejo de la estructura de la vegetación. Aspectos todos estos últimos en los que el modelamiento de cuencas puede jugar un papel muy importante.



### III. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

#### 3.1 Hipótesis de trabajo y diseño experimental

Las comunidades vegetales más conservadas (altamente estructuradas) no necesariamente representan la condición ambiental más deseable en términos de retención de la humedad en la cuenca o área de captación, ya que si bien pueden aminorar el tiempo en la respuesta hidrológica, su mayor intervención en el balance hídrico es por evapotranspiración (específicamente evaporación subsecuente de la lluvia interceptada) y no por retención de humedad.

El diseño experimental consiste en distinguir primero si existen diferencias significativas en las magnitudes de capacidad de almacenamiento de agua en el dosel en distintos arreglos estructurales de la vegetación medida en lotes de escurrimiento experimentales por estimación de interceptación es decir la diferencia entre la precipitación total menos la precipitación neta (precipitación directa + escurrimiento fustal). Posteriormente se comparan los hidrogramas de escurrimiento directo a la salida de las AC experimentales y los hidrogramas de precipitación total, estableciéndose clases o niveles relativos de RH, para clases o niveles equivalentes de tormentas. Con un tratamiento similar al efectuado a los lotes de escurrimiento pero extrapolando la información del muestreo de la vegetación realizado en la superficie de las áreas de captación experimentales se procede a la generación de modelos actuales y potenciales del escurrimiento en función de los arreglos estructurales de la vegetación.

El diseño experimental formalizado intenta probar que:

- Existen diferencias significativas en la magnitud de escurrimiento observado en condiciones de arreglos estructurales distintos de la vegetación.
- La magnitud del escurrimiento a nivel de parcela experimental y a nivel de AC puede correlacionarse con algunos parámetros estructurales de la vegetación.

## **3.2 Objetivos**

### **Objetivo general**

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo general del presente estudio es identificar descriptores de la estructura de la vegetación relacionados con la Respuesta Hidrológica, agrupando unidades espacio-temporales que puedan ser incorporadas a ejercicios de modelamiento ambiental en el área de estudio, una cuenca hidrográfica forestal del estado de Michoacán.

### **Objetivos particulares**

1. Caracterizar por sus atributos físicos y de cobertura vegetal las unidades potenciales de RH en el área de estudio, distinguiendo las AC experimentales más adecuables para el estudio y delineando URHC.
2. Identificar, caracterizar y agrupar los principales rasgos de la estructura horizontal y vertical de las asociaciones vegetales en las áreas de captación experimentales y el área de estudio, desde los niveles de formación vegetal (tipo de vegetación) hasta el nivel de asociación.
3. Estimar intercepción y escurrimiento a partir de lotes o parcelas experimentales de diferentes arreglos estructurales de la vegetación y relacionar los valores puntuales con aquellos a mayor escala derivados de la comparación relativa de hidrogramas de precipitación total y escurrimiento directo en 2 áreas de captación experimentales durante las tormentas del año hidrológico 2004.
4. Calibrar un modelo hidrológico sensible a las variaciones espaciales de la estructura de la vegetación, considerando la contribución de flujos por unidad de tiempo de los componentes de la estructura de la vegetación y la respuesta hidrológica de los sitios y áreas de captación experimentales instrumentados y
5. Simular escenarios ambientales actuales y potenciales para el manejo de la estructura de la vegetación en el área de estudio.

### **3.3 Fases del trabajo**

La primera fase, consistió en ubicar las distintas unidades de respuesta hidrológica (convencionales) a partir de los atributos físicos y de cobertura vegetal del área de estudio, expresada esta última en clases de valores de NDVI.

Una segunda fase aborda el objetivo 2. Con información derivada del análisis de ortofotos digitales del año 1994 y el procesamiento de imágenes satelitales ETM de los años 2000 y 2002 así como mediante validación de dichos datos con recorridos en campo el área de estudio, se llevó a cabo una clasificación a nivel de formaciones vegetales y la descripción de los principales descriptores estructurales de las comunidades vegetales reconocidas.

En la tercera fase del proyecto la tarea consistió en la instrumentación y medición de los parámetros precipitación, intercepción y escurrimiento en diferentes arreglos estructurales de vegetación, comprendiendo desde la condición más sencilla (representada solo por un estrato herbáceo) hasta la condición más altamente estructurada (representada por distintas condiciones de cobertura del suelo en un enclave mesófilo) de la vegetación. Por otro lado, fueron instrumentadas con dispositivos para la obtención de lecturas periódicas de escurrimiento y de precipitación, aforos de las AC experimentales, en periodos alternativos de la temporada lluviosa de 2004, con objeto de disponer y comparar los hidrogramas de precipitación con los correspondientes hietogramas de escurrimiento y evaluar así la RH de las AC experimentales.

En la cuarta fase del proyecto, la información de las tasas de escurrimiento medidas (y asociadas a la RH) de las condiciones estructurales de la vegetación en las AC experimentales es utilizada en un ejercicio de calibración de un Modelo Hidrológico espacialmente distribuido, basado físicamente y sensible a la capacidad de almacenamiento de agua en distintos arreglos estructurales de la

vegetación, para simular escenarios ambientales actuales en las AC experimentales.

En la fase final se ejecuta el modelo calibrado para presentar diferentes escenarios ambientales de escurrimiento y periodos de retención de humeada en la cuenca, a partir de Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) actuales y las potenciales en las que la estructura de la vegetación es una de las principales variables involucradas.

### **3.4 Fase I: Caracterización del contexto físico del área de estudio**

La caracterización del contexto físico del área de estudio se desarrolló con el propósito de identificar unidades homogéneas en cuanto a sus características físicas y de densidad de cobertura vegetal (convencionalmente denominadas URH), en donde pudieran orientarse los muestreos experimentales para el estudio de la influencia de la estructura de la vegetación en el fenómeno de RH, atendiendo a la primera de las fases del trabajo.

El esquema general de este procedimiento consistió en la delimitación del área de estudio como la cuenca de captación que comprende el Parque Nacional Cerro de Garnica, la conformación de una base de datos geográfica con diferentes capas temáticas derivadas de la información topográfica, hidrológica, geológica, edafológica y densidad de cobertura vegetal de esta área, la identificación de unidades espaciales con parámetros físicos y de cobertura vegetal más o menos homogéneas entre sí y la inspección en campo de estas.

#### **3.4.1 Base de datos geográfica**

Fue identificada el área concerniente al decreto del Parque Nacional Cerro de Garnica en la carta topográfica impresa escala 1:50,000 E14A24, Tzitzio (INEGI 1998). Se procedió a la generación de un Modelo Digital de Terreno (MDT) a partir

de un proceso de interpolación<sup>9</sup> de las curvas altitudinales de la carta en formato digital de INEGI (2001). El MDT fue la base para la ejecución del modulo HEC GEO-HMS en el sistema ArcView con el que fue delineada como área de estudio una cuenca vertiente del Río Balsas, en donde el Parque Nacional cerro de garnica tiene su mayor extensión.

Otras capas del modelo vectorial disponible fueron incorporadas directamente a la Base de Datos Geográfica (BDG): cotas altitudinales a 20 m, vías de conducción de agua, vías de transportación, líneas de conducción y transmisión, asentamientos humanos y polígono del Parque.

Las coordenadas extremas (UTM *datum* ITRF92<sup>10</sup>) que comprende el área de estudio fueron convertidas a coordenadas geográficas y ubicadas en las cartas geológica (CGSNI-INEGI 1978) y edafológica (CGSNI-DGETNAL-INEGI 1979), conteniendo referencias posicionales en el *datum* horizontal NAD27<sup>11</sup>. Los vectores correspondientes a Fallas, Fracturas, Tipo de Roca, Tipo de Suelo y Textura fueron digitalizados en el sistema CartaLynx 1.04, proyectados al *datum* ITRF92 y exportados a la BDG.

### 3.4.2 Parámetros morfométricos del área de estudio y AC

Fueron calculados los parámetros morfométricos relacionados potencialmente con la RH tanto para el área de estudio como para las AC delineadas mediante el procedimiento descrito en el apartado anterior. Esto parámetros fueron (ver Apéndice 1):

- a) Cociente de circularidad (**Rc**). El cociente estimado para cada AC fue agrupado luego en 4 clases de valores de 0.1 de magnitud del cociente con objeto de facilitar su despliegue y posterior análisis.

---

<sup>9</sup> Red de Triangulación Irregular (TIN por sus siglas en inglés) con líneas de quiebre duro (ESRI 1998).

<sup>10</sup> Proyección Universal Transversa de Mercator con *datum* horizontal International Terrestrial Reference System de 1992.

<sup>11</sup> North American Datum de 1927.

- b) Pendiente. Fue calculada a partir del MDT en grados. De manera similar que con el parámetro anterior, los valores promedio de las AC fueron agrupados en 6 clases, en este caso de 5 grados de magnitud cada una.
- c) Densidad de drenaje (**Dd**). Los valores del cociente resultante (Dd) para cada AC fueron agrupados en 6 clases de  $1 \text{ km/km}^2$  de magnitud.
- d) Tiempo de concentración (**tc**). Los valores resultantes fueron agrupados en 6 clases en orden descendente de 2 minutos de magnitud cada una.
- e) Tipos de roca y de suelo. Son los principales factores que afectan la RH dada su capacidad de infiltración y conductividad hidráulica. Como en el área de estudio los tipos de roca y suelo no están muy diversificados, fue posible agrupar mediante un proceso de intersección en una sola capa vectorial las 9 combinaciones posibles, todas ellas presentes en el área de estudio. La abundancia proporcional de estas unidades lito-edafológicas fueron un insumo para la identificación de unidades homogéneas.
- f) Fallas y fracturas. Fue generado un mapa booleano considerando la presencia (= 0) o la ausencia (=1) de fallas o fracturas en las áreas de captación identificadas.
- g) Áreas de captación de 1er. orden. Son áreas que aportan flujos a corrientes de 1er. orden por lo tanto se encuentran aisladas de corrientes tributarias y sus parteaguas son relativamente sencillos de identificar en campo por lo que se consideró importante distinguirlas de las primeras mediante álgebra booleana en la BDG. Como en el caso anterior, la condición de 1er orden se distingue con el valor 1 mientras que las áreas de captación que reciben o forman parte de corrientes de 2º, 3er o 4º orden les fue asignado el valor 0.

- h) Índice de Vegetación Normalizado (NDVI). Tomando como base las bandas 1, 2, 3 y 4 de una imagen Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper del año 2000, comprendiendo el área de estudio, se procedió a generar un Índice de Vegetación conforme la Ecuación 12. Los valores promedio para cada una de las AC, fueron agrupados en 6 clases, comprendiendo el rango de - 0.1 a 0.5 de magnitud resultante.

#### 3.4.3 Unidades Homogéneas y Selección de Sitios

Una primera agrupación de Unidades Homogéneas la constituyó la serie cartográfica generada a partir del establecimiento de clases o categorías de valores de los distintos parámetros evaluados. La segunda agrupación consistió en la identificación de Unidades de Respuesta Hidrológica Convencionales (URHC), mediante la sobreposición de las capas temáticas: tipo de roca, tipo de suelo y tipo de vegetación (Hay et al. 1993 y Neitsch et al. 2001), en este último caso, se consideró la densidad de cobertura vegetal expresada en las clases de Índice de Vegetación obtenidos.

Los criterios que orientaron la selección de los sitios más apropiados para la ubicación de los muestreos experimentales fueron:

- Áreas de captación de 1er orden. Con objeto de aislar consistentemente el escurrimiento superficial de descargas tributarias.
- Sin fallas ni fracturas. Se prefirieron estas para omitir los efectos potenciales de atenuación de RH por infiltraciones.
- Similitud de parámetros físicos. Con objeto de mantener lo más constante el efecto de la morfometría del área de captación en la RH.
- Homogeneidad o predominancia de unidad litoedafológica. Con objeto de mantener constante los efectos de las propiedades conductividad hidráulica del substrato en la RH.
- Índice de Vegetación. Se prefirieron las áreas con la clase mayor de valores de NDVI considerando que en ellas se concentra la mayor densidad de cobertura vegetal.

Fue seleccionado un primer conjunto de áreas de captación de primer orden sin fallas ni fracturas. Estas, fueron contrastadas en pares de muestras por la magnitud de sus parámetros: pendiente promedio, cociente de circularidad, densidad de drenaje y tiempo de concentración, usando los valores de una matriz de semejanza generada mediante el algoritmo de Porcentaje de Similitud (Sokal y Michener 1958 citados por Matteucci y Colma 1982, ver Apéndice 1).

Las AC más similares, identificadas mediante un procedimiento de aglomeración por el método de unión promedio (UPGAM por sus siglas en inglés), fueron sobrepuestas a las URHC, seleccionando solo aquellas con mayor homogeneidad de combinación de atributos de roca, suelo y densidad de cobertura vegetal.

Con un enfoque complementario de selección de sitios, fue aplicado un análisis multicriterio, mono-objetivo con el módulo MCE del sistema Idrisi 32 (Saaty 1987) el cual requirió previamente la ejecución de la estandarización y ponderación de valores de clase de dichos parámetros. La estandarización se inclinó hacia los valores promedio que muestran las AC en los mismos parámetros sometidos a análisis UPGAM, sin embargo, fue ponderado como mas alto el criterio de mayor valor de NDVI promedio.

### **3.5 Fase II. Estructura de la vegetación del área de estudio y de las AC experimentales**

#### **3.5.1 Vegetación del área de estudio**

Para el reconocimiento de los tipos de vegetación en el área de estudio y su distribución, así como su incorporación a la BDG, fue seguido un procedimiento similar al descrito en el apartado “Base de datos geográfica”, primeramente, considerando las categorías de tipos de vegetación y usos del suelo contenidos en la carta 1:50,000 del INEGI (1983).



Tomando en cuenta lo anterior, se llevó a cabo una reclasificación de dicha cartografía conforme a los criterios para la clasificación de comunidades vegetales a nivel de formación vegetal subformación, series de asociaciones y asociaciones vegetales siguiendo a diversos autores.

En ese mismo contexto de criterios fueron poligonizadas las ortofotos digitales escala 1:75,000 de INEGI (1994) del área de estudio. Posteriormente, se efectuaron clasificaciones supervisadas de la escena multiespectral ETM del año 2000 y ETM+ del año 2002 mediante la ejecución de un clasificador duro a partir de campos de entrenamiento que tomaron como base las categorías asentadas de formaciones vegetales reconocidas para los años 1983 y 1994 (cartografía y ortofotos del INEGI), y la inspección en campo de 33 sitios de verificación conducidos durante el desarrollo del presente trabajo (2003-2004).

Fueron generados un total de 122 campos de entrenamiento para identificar comunidades vegetales reconocidas en la cartografía de INEGI en 1983, interpretadas en la ortofoto digital provista por la misma dependencia correspondiente al año 1994 y prevalecientes (conforme a los recorridos de campo realizados) los años 2003-2004 en el área de estudio (Figura 3.1). Con dicha información, que comprende aproximadamente 8.4% de la superficie total del área de estudio, se obtuvieron las firmas espectrales de 8 categorías de tipo de vegetación y uso del suelo potencialmente presentes en las subescenas ETM correspondientes a la banda del rojo, azul, verde e infrarrojo cercano, de los años 2000 y 2002.

Se compararon las firmas espectrales en cada una de las bandas y se ejecutó el clasificador usando solamente aquellas más convenientes que no mostraban sobreposición de la firma. Se prefirió el clasificador Bayesiano de Máxima Verosimilitud (módulo MAXLIKE de Idris 32), por las bondades que se señalan de este método en la literatura (Townshend 1981, Lillesand & Kiefer 1987, Chuvieco 1990, Diez 1993 y Richard 1986 citado por Eastman 2000).

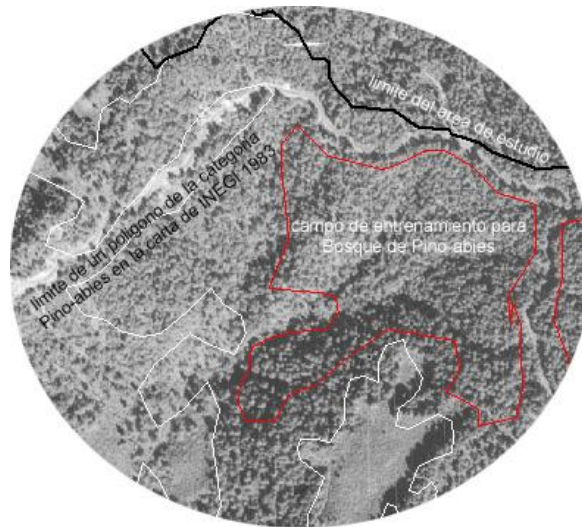


Figura 3.1 Ejemplo de polígono seleccionado como campo de entrenamiento para la clasificación de las escenas ETM del año 2000-2002 y 2003, a partir de la ortofoto digital de INEGI 1994 y recorridos de campo en 2003-2004.

De Julio a Noviembre de 2003, previamente y durante la ejecución del muestreo a la vegetación, se realizaron colectas de distintas muestras botánicas pertenecientes a los estratos herbáceo, arbustivo y arbóreo en las AC experimentales. Una vez herborizados los especímenes, estos fueron determinados mediante literatura relacionada con el tema y la zona (McVaugh 1974, 1984, 1985, 1987, 1989, 1990 y Rzedowski y Rzedowski 2001).

### 3.5.2 Comunidades vegetales de las AC experimentales

Utilizando las ortofotos digitales (“b” y “e”) de la carta E14A24 correspondiente al año 1994 de los vuelos del INEGI y la imagen con las formaciones vegetales clasificada conforme al apartado anterior, se procedió a la identificación y delineación en pantalla de de las asociaciones vegetales en las AC experimentales, mediante la interpretación de tonalidades, texturas y rasgos visibles de las copas de los árboles. Para esta actividad, se contó con la asistencia de personal técnico que habitualmente elabora programas de manejo y lleva a cabo labores de marcaje, derribo y movilización de productos forestales para

diversos propietarios de predios en esa región del estado. Pero sobre todo, considerando los muestreos realizados a los estratos arbóreo y arbustivo en esta porción del área de estudio.

El muestreo a la vegetación adoptado fue el propuesto por Cottam y Curtis (1956) conocido como *Cuadrantes centrados en un punto*, el cual se complementó en los aspectos concernientes a la obtención de la cobertura elaborándose los formatos apropiados para el registro de la información en campo (Apéndice 1).

Fueron levantados un total de 96 sitios de muestreo durante 22 días de trabajo de campo comprendidos entre el 1 de noviembre al 22 de diciembre de 2003 y entre el 13 y el 27 de marzo de 2004.

El conjunto de especímenes que no pudieron reconocerse en campo fueron colectados, herborizados e identificados en gabinete mediante claves y guías fotográficas (McVaugh 1974, 1984, 1985, 1987, 1989, 1990 y Rzedowski y Rzedowski 2001, Standley 1920-1926, Pennington y Sarukhán 1968 y Torres 1994). Por otra parte, la información levantada en campo permitió corregir la etiqueta de los polígonos delineados preliminarmente en gabinete mientras que el procesamiento de datos permitió obtener los siguientes descriptores de la comunidad: Índices de diversidad y equitatividad (Shannon, Simpson y Brillouin); Altura y profundidad de dosel; Cobertura por área basal; Frecuencia, Densidad y Valor de Importancia. A partir de los valores relativos de abundancia, dominancia y frecuencia de las especies, Cox (1967) sugiere la obtención de dicho valor de importancia de la manera siguiente:

Densidad relativa + Dominancia relativa<sup>12</sup> + Frecuencia relativa = Índice de Valor de Importancia (i.v.i.)

---

<sup>12</sup> Generalmente se usa la dominancia por cobertura mediante el criterio de área basal.

En gabinete se procedió a la agrupación de los datos de los sitios de muestreo por rodal predefinido y a la obtención de valores de importancia considerando los siguientes fundamentos:

- a) Densidad. El cuadrado de la distancia promedio al centro del sitio de los individuos del estrato arbóreo de la misma especie muestreados en un rodal fueron usados como denominador para una estimación de densidad de individuos por ha ( $10,000 \text{ m}^2$ ) de acuerdo con el procedimiento señalado por Cottam y Curtis (1956). El mismo procedimiento se siguió con los individuos del estrato arbustivo ajustándolo a una superficie de  $100 \text{ m}^2$ .
- b) Cobertura. El cuadrado del radio promedio de las copas medidas de los individuos de una especie fueron multiplicados por el valor  $\pi$  ( $\rho i$ ) para la obtención del valor promedio de la proyección vertical de la copa de las especies en cada rodal. El procedimiento se aplicó también tanto para el estrato arbóreo como para el arbustivo.
- c) Área basal. El producto del cuadrado del radio promedio obtenido de los individuos de la misma especie -a partir de las mediciones de d.a.b.- por el valor  $\pi$  (" $\rho i$ "). En el caso del estrato arbustivo este valor se ajustó a  $\text{cm}^2$  y en el caso del estrato arbóreo a  $\text{m}^2$ .
- d) Profundidad de copa. La diferencia promedio entre la altura total de los individuos de la misma especie y el promedio de sus alturas a la primera rama con hojas.

### 3.5.3 Porosidad óptica del dosel

Para la obtención de la porosidad óptica del dosel se obtuvieron 4 fotografías digitales verticales de  $900 \times 600$  píxeles por sitio de muestreo con una lente de  $38^\circ$ , distribuyéndose radialmente a 3 m del centro del sitio la obtención de las escenas y procurando su adquisición entre las 9 y 13 hrs. y las 15 y 18 hrs. –

respectivamente- con objeto de evitar reflejo en tallos y hojas en las horas de iluminación natural más vertical.

Fueron procesadas las fotografías verticales de cada uno de los sitios de muestreo mediante el programa *Adobe Photoshop 6.0*. Se extrajeron los 282,800 píxeles centrales de cada fotografía, se transformaron de color a escala de grises y supervisadamente fueron seleccionados por gama de colores (tonalidades de gris) los píxeles correspondientes al cielo, para la obtención de un valor promedio proporcional correspondiente al porcentaje de porosidad óptica del dosel en cada sitio (Figura 3.2).

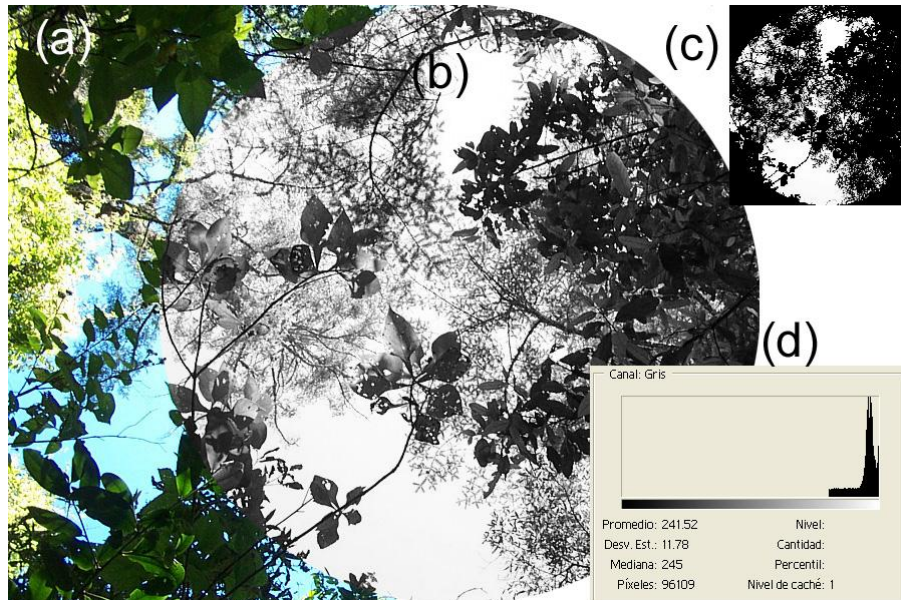


Figura 3.2 Procesamiento de las fotografías digitales verticales para la obtención de valores promedio de porosidad óptica. (a) fotografía original; (b) transformación a escala de grises de la porción central; (c) selección de tonalidades de gris y (d) estadísticos a partir de los cuales se define la proporción de porosidad óptica del dosel.

### 3.6 Fase III. Instrumentación de AC y lotes de escurrimiento experimentales

Una vez caracterizada el área de estudio en parámetros morfométricos y litoedafológicos de sus AC (fase I) así como la estructura horizontal y vertical de la vegetación de aquellas AC más similares y adecuadas para su instrumentación (fase II), en la tercera fase del proyecto la tarea consistió en la instrumentación de

las AC y los lotes de escurrimiento experimentales para la generación de la información hidrológica que permitiera la estimación de la RH y las contribuciones parciales de los atributos de la vegetación. Esta tercera fase se llevó a cabo considerando los siguientes pasos:

### 3.6.1 Tormentas de diseño para la construcción de los vertedores

Se analizaron los datos de precipitación máxima y acumulada en 24 hrs. de las estaciones meteorológicas ubicadas en las proximidades de las AC seleccionadas, apoyándose además en mediciones en campo de los niveles máximos ordinarios y niveles máximos extraordinarios de los cauces a las salidas de las mismas.

La determinación del evento de diseño que se consideró para la construcción de los vertedores siguió los siguientes criterios:

- a) Que la obra permitiera la observación de variaciones en el nivel de flujo ordinarios.
- b) Que la obra permitiera la salida de excedencias de eventos extremos extraordinarios (periodo de retorno mayor de 10 años) y
- c) Que la obra permitiera el monitoreo de eventos cuya magnitud excediera la capacidad de almacenamiento de agua por el dosel.

Mediante el método de curva numérica se estimaron por tanto solo caudales pico ordinarios. Dicho método se sintetiza en las ecuaciones **6, 7, 8 y 9**. Este método no considera el tiempo de descargas pico, la lámina resultante en cada una de las AC experimentales correspondería a volúmenes de escurrimiento que no consideran el lapso en que la descarga del evento transcurre, alcanza un pico y finalmente decrece posteriormente al evento. Dado lo anterior se siguió el método deductivo de Hidrograma Sintético Adimensional propuesto también por el SCS para estimar el valor de escurrimiento directo al pico de la descarga (ecuación **10**).

Asimismo y con base en distintos modelos de gasto para vertedores rectangulares (ver Apéndice 1) se estimaron las dimensiones convenientes de estanques

nivelados y vertedores que permitieran la obtención de datos para la elaboración de hidrogramas de escurrimiento directo en las AC (Figura 3.3).

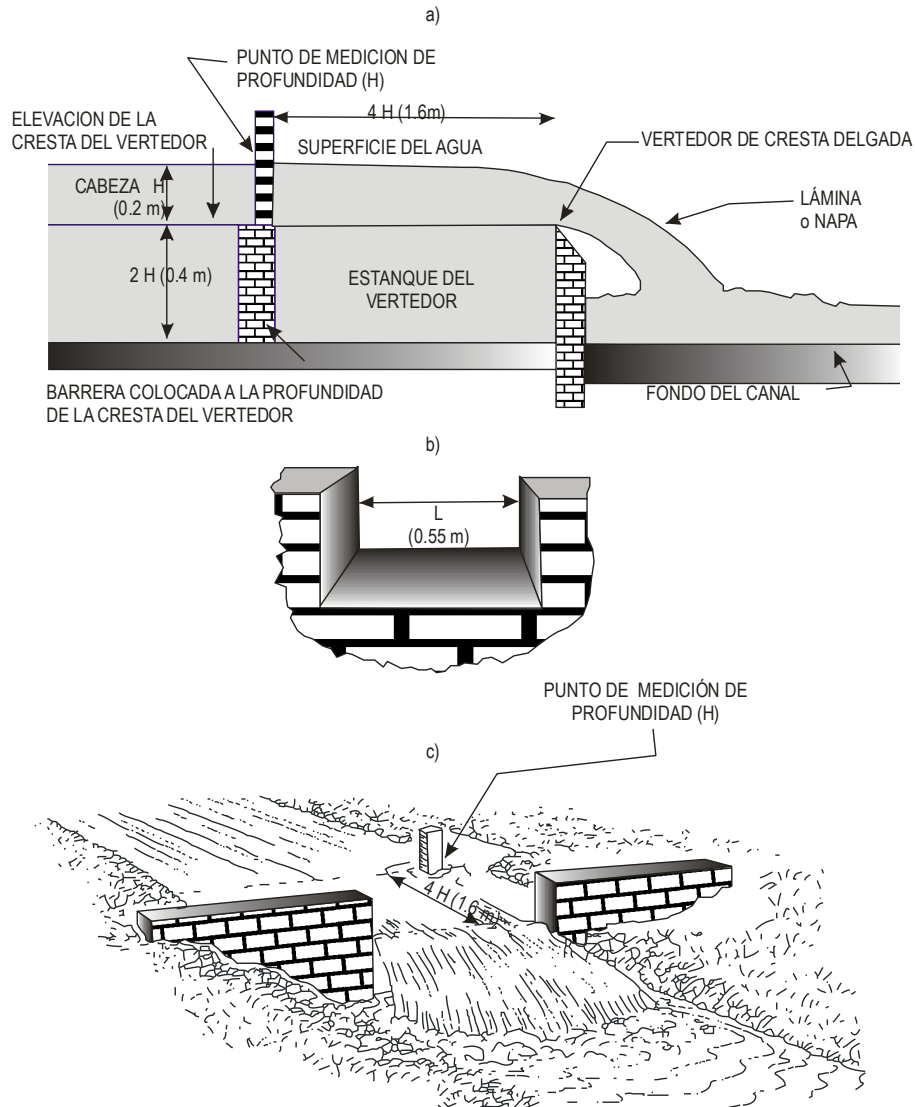


Figura 3.3. Esquema del vertedor rectangular para medición de escurrimiento en las respectivos aforos de las AC experimentales a) vista lateral y b) vista del vertedor (Modificado de Smajstrala y Harrison 1981).

Para la obtención de las mediciones periódicas de los niveles de intensidad de precipitación y niveles alcanzados por el estanque nivelado se instalaron un data logger pluviométrico y un data logger de nivel a 40 cm de profundidad en el estanque, ambos en una propiedad privada en las cercanías de la AC 18 (Figura 3.4).

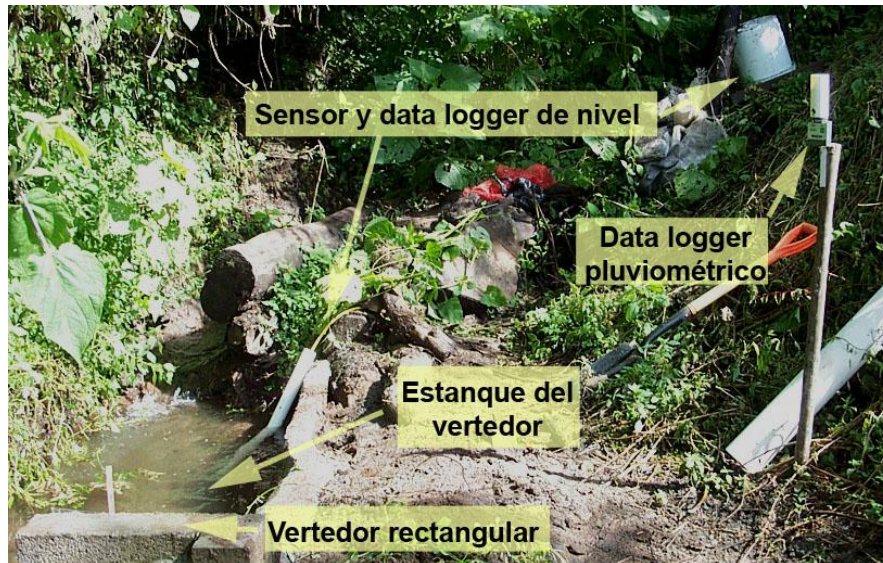


Figura 3.4 Instrumentación en el aforo de la AC18 para el registro de niveles de caudales e intensidades de precipitación.

### 3.6.2. Asociaciones vegetales tipo para el muestreo

Las asociaciones vegetales fueron definidas conforme a las especies arbóreas y arbustivas con mayores valor de importancia y fueron seleccionadas para el muestreo experimental mediante lotes de escurrimiento, aquellas que mostraron heterogeneidad específica y estructural (estratos verticales) y aquellas que contrastaban de manera significativa en su composición y estructura tratando de representar en lo posible al conjunto de comunidades presentes en el área de estudio y próximas a vías de comunicación.

La localización específica para la instrumentación de cada asociación a muestrear experimentalmente mediante lotes de escurrimiento consideró los siguientes criterios:

- a) Un sitio con estrato arbóreo de composición y estructura heterogénea (especies, altura, profundidad de copa, porosidad óptica del dosel, cobertura de copa y d.a.p. y área basal) toda vez que si bien la asociación en que se instalara no sería del todo representativa de las condiciones prevalecientes en toda la superficie de las AC, dicha heterogeneidad estructural y en especies permitirá la derivación de información para



formaciones vegetales que no serían instrumentadas y sometidas a muestreo experimental por este procedimiento.

- b)** Homogeneidad de la pendiente a lo largo y ancho de toda la unidad a muestrear mediante lotes de escurrimiento, con objeto de no incorporar abstracciones a la precipitación resultado de encharcamientos temporales.
- c)** Relativa accesibilidad, proximidad y alineación espacial lo más sencilla posible para facilitar los recorridos para la obtención de registros periódicos posteriormente a las tormentas.

Se instalaron siete lotes de 1.25 x 5 m (6.25 m<sup>2</sup>) en dos asociaciones vegetales contrastantes. Un conjunto (4 lotes) en una asociación vegetal con sus estratos arbóreos arbustivos y herbáceos bien desarrollados y el segundo conjunto (3 lotes) en una asociación vegetal solo con el desarrollo de los estratos arbustivos y herbáceos.

Todos los lotes estuvieron limitados por un borde de lámina de cartón de 3 mm de espesor y 30 cm de altura, hundido en el suelo aproximadamente 10 cm con objeto de independizar los escurrimientos superficiales exteriores de los que ocurren en el interior de cada lote así como de flujos laterales subsuperficiales y de salpicaduras del entorno adyacente.

El lote 1 fue ubicado en la asociación vegetal con desarrollo del estrato arbóreo conteniendo todos sus elementos (árboles, arbustos, hierba y hojarasca). El lote 2 conteniendo todos los componentes excepto el estrato arbustivo (árboles, hierba y hojarasca). El tercer lote exceptúa tanto el estrato arbustivo como el herbáceo y el cuarto lote exceptúa el estrato arbustivo, el herbáceo y la hojarasca. En el caso de los lotes instalados en áreas sin estrato arbóreo contienen 3 tratamientos: Lote 5: arbustos y hierbas; Lote 6: solo hierba y Lote 7: suelo desnudo, siendo las dimensiones de éstos como los anteriores de 5 x 1.25 m.

Cada lote deriva los escurrimientos superficiales en vertedores metálicos que conducen los escurrimientos superficiales a recipientes plásticos (A) de 20 lt.

(Figura 3.5a). Dichos recipientes cuenta con 10 orificios de dimensiones constantes (1 cm de diámetro) colocados a una altura uniforme (y por tanto el volumen correspondiente es conocido). Uno de tales orificios se conecta a una segunda serie de recipientes (B) de igual capacidad (20 lt), de tal manera que cuando el 90% del flujo superficial de una sección del lote excede la capacidad del primer recipiente, tal volumen más 10 veces el volumen contenido en el segundo recipiente permite estimar el escurrimiento total en el tratamiento correspondiente (Figura 3.5b).

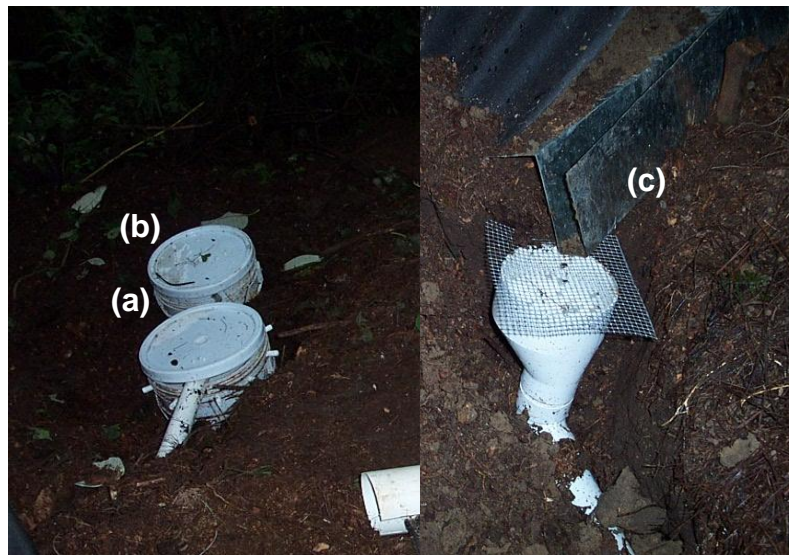


Figura 3.5. Disposición de recipientes para la medición de escurrimiento en los lotes experimentales. (a) primer recipiente de 20 lt con 10 perforaciones de 1 cm de grosor; (b) segundo recipiente de igual volumen; (c) detalle de la canaleta vertedor al ducto derivador a los recipientes para evitar taponamiento por hojarasca y fauna.

Todos los recipientes que se utilizaron para este fin fueron de forma regular y dimensiones conocidas, apropiados a las magnitudes estimadas que almacenarían. Estuvieron cubiertos con una tapa de plástico removible para evitar contribuciones por precipitación directa en su interior y facilitar las lecturas.

Para estimar la precipitación directa (al nivel del piso de la comunidad) se utilizaron canaletas de cartón impermeabilizado de 0.60 x 1.2 m, sobrepuestas 10 cm en sus extremos hasta completar una superficie efectiva de captación de 10

m<sup>2</sup>, en este caso de precipitación directa (la que alcanza el piso de la comunidad). Estas canaletas se conectaron con tubería de PVC de 10 cm de diámetro (Figura 3.5c) cubierta con tela de alambre para evitar su taponamiento por hojarasca y/o fauna nativa y fueron conectadas a una tercera serie de recipientes plásticos en este caso de 50 lt respectivamente (C) como se esquematizó en la figura 3.6.



Figura 3.6 Extremo de la canaleta de lámina de cartón utilizada para la estimación de Precipitación Directa (troughfall o TF) que es la que alcanza el suelo de la comunidad e incluye goteo de las copas de los arboles (crowndrip).

Para medir escurrimiento fustal (SF) se colocaron collares o serpentines de poliducto de 1 pulgada (2.54 cm de diámetro) circulando 2.5 vueltas a los troncos de cada individuo arbóreo (d.a.p. > 5 cm y altura mayor de 4 m). Para la instalación del serpentín se realiza una ranura superficial continua en la corteza del árbol con el mismo ancho del poliducto y se fija con alambre metálico, sellando la unión de la corteza del árbol y el poliducto con silicón comercial. Los ductos se conectan individualmente a recipientes de 20 lt de capacidad cuyo número total fue de 10 (Figura 3.7).



Figura 3.7. Collares o serpentines para estimación de escurrimiento fustal (SF) en el lote 1 (estrato arbóreo -suelo desnudo).

El diseño montado de conjunto (Figura 3.8) tanto en el interior de la asociación arbórea como en las comunidades vegetales sin presencia de estrato arboreo, permitió la obtención de información para derivar los distintos parámetros del modelo analítico de Gash y del análisis a las distintas tormentas monitoreadas en 2004 a nivel de lotes experimentales.

Primero fue estimada por diferencia entre precipitación total menos escurrimiento observado la magnitud y proporción de la lámina del conjunto de abstracciones por tratamiento y por rango de precipitación. Luego, por diferencia de precipitación incidente menos precipitación directa (TF) se determina la magnitud y proporción de la fracción de abstracciones correspondientes a interceptación (I) (ecuación 2). Entonces se aplican las ecuaciones 5 y 6 considerando  $P' = I$  para estimar las fracciones correspondientes a almacenamiento de agua en dosel ( $P'G$ ) y la parte correspondiente a tallos y troncos ( $P't$ ). La pendiente y la ordenada al origen de la relación de regresión entre el escurrimiento fustal contra precipitación incidente corresponden a los parámetros  $p_t$  y  $s_t$  respectivamente. Por último, se despeja  $S$  de la ecuación 5 obteniéndose para cada tratamiento de condición arbórea el valor

de dicho parámetro el cual se considera de magnitud constante en tanto no se incrementa la biomasa.



Figura 3.8. Disposición de final de 4 de las 7 parcelas experimentales para medición de escurrimiento y 1 de 5 canaletas para estimación de precipitación directa en el interior de la asociación con desarrollo de estrato arbóreo.

Posteriormente y en virtud de que en los lotes ubicados en condición de comunidades sin desarrollo de estrato arbóreo (matorral y herbazal) no existe la posibilidad de determinar TF y SF, los valores del parámetro S se obtuvieron por interpolación conforme al comportamiento incremento lineal del porcentaje de intercepción en los distintos tratamientos.

### **3.7 Fase IV: Calibración del Modelo Hidrológico**

La cuarta fase del proyecto parte del supuesto de que toda vez que es factible identificar por tipo de comunidad vegetal un valor de la capacidad de almacenamiento de agua en el dosel y de que se dispone de información empírica susceptible de establecer eventuales extrapolaciones mediante ejercicios de correlación y regresión de dicho parámetro S del modelo de Gash, la RH asociada

con estructuras particulares de la vegetación, estos productos pueden incorporarse en la calibración de un modelo hidrológico y que tal información temática geográfica pueden ser la base para desarrollar los ejercicios de simulación de escenarios ambientales en la siguiente fase. La estrategia seguida en la cuarta fase del estudio, previamente a los ejercicios de calibración y ejecución del Modelo Hidrológico consistió en :

1. Destacar mediante un análisis multivariado (PCA) y probar la linealidad de la relación con la magnitud e intensidad de los eventos de 2004, aquellos parámetros contenidos en los hidrogramas de precipitación y escurrimiento obtenidos mediante la instrumentación de las 2 áreas de captación experimentales, y que como procede en su ejercicio Swank et al 2001, se proyectan ser: Tasa de flujo inicial (lt/s); Tasa de flujo al pico de la descarga (lt/s); Tiempo al pico (min); Lámina total escurrida del evento (mm); Lámina escurrida antes del pico de la descarga (mm); Lámina escurrida después de la descarga (mm); Duración total del escurrimiento ( $h$ ) y Tiempo de recesión (Lag).
2. La calibración del modelo hidrológico (HEC) se realizó con dos rutas. Ambas a partir de destacar aquellas tormentas mas comparables desde el punto de vista de us magnitud y duración en ambas AC y con base en los planteamientos del Modelo de Curva Numérica del SCS. La primera ruta siguió la simulación de hidrogramas de flujo de la descarga a partir de series de tiempo de precipitación acumulada en 5 minutos (mm) y gasto del vertedor en las respectivas AC con el módulo HMS (Hidrologic Modelling System) (Figura 3.9), mientras que la segunda ruta partió de la generación y ajuste del mismo tipo de hidrogramas pero con información especializada en el mismo modelo HEC con su modulo GEO-HMS, el cual no incorpora, los valores rasterizados de curva numérica, abstracción inicial, ET ni Lag. a partir de la cartografía en formato raster, sino que tiene que ser alimentado manualmente.

3. La validación de los modelos se llevó a cabo mediante el módulo de optimización de pruebas (“trial optimization”) del módulo HMS.

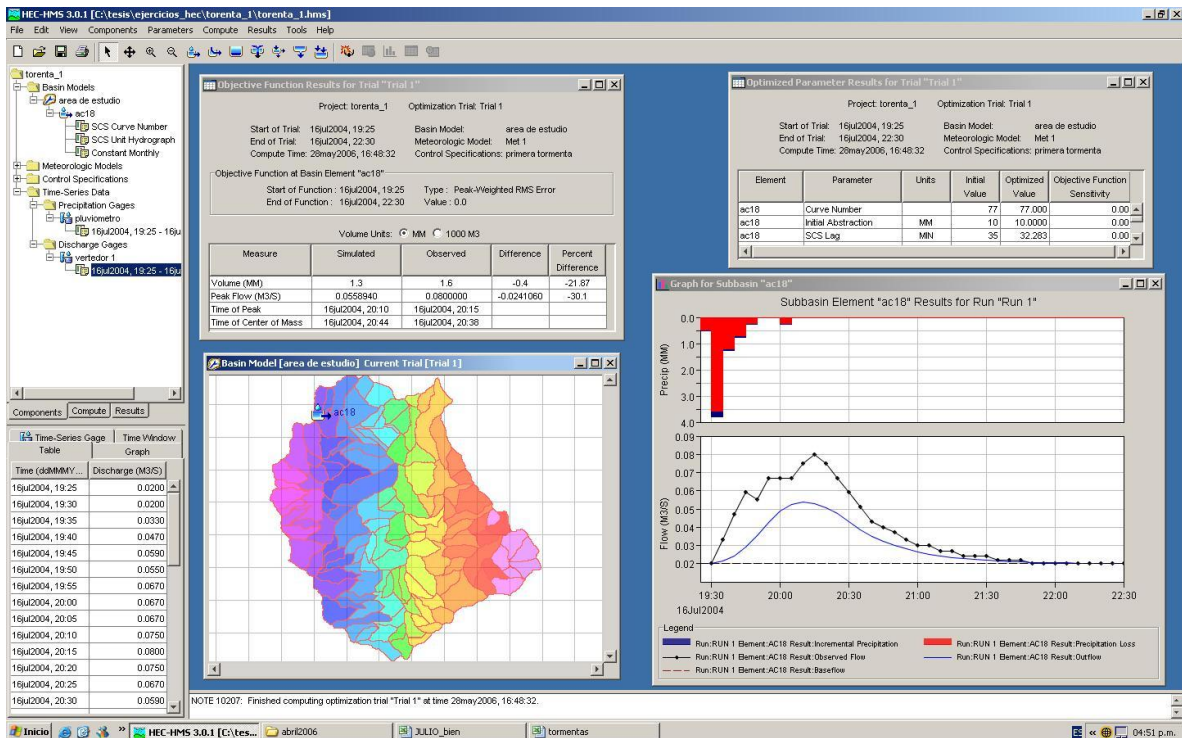


Figura 3.9. Ejercicio de calibración y validación del modelo HEC-HMS con información de la primera tormenta muestreada y su descarga en el AC18.

### 3.8 Fase V: Generación de Escenarios Ambientales

Por otro lado, los resultados derivados del análisis multitemporal de cambios en tipos de vegetación y uso del suelo del área de estudio sirvieron como base para la definición de los dos escenarios previos al primer ejercicio de simulación con el modelo HEC. Las tendencias más evidentes en dichos cambios de uso de suelo y vegetación sirvieron para generar un escenario proyectado a 10 años (año 2013) que se utilizó en el correspondiente escenario hidrológico. Finalmente se ejecutó el modelo con objeto de generar escenarios simulados para la misma fecha proyectada considerando un ejercicio multicriterio de zonificación en el que fueron hipotéticamente fueron aplicadas prácticas de manejo de conservación y fomento de la estructura de la vegetación.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Fase I: Caracterización del contexto físico del área de estudio

#### 4.1.1 El área de estudio

Se ubica entre los paralelos 19° 36' y 19° 41' de latitud norte y los meridianos 100° 47' y 100° 52' de longitud al oeste de Greenwich. Forma parte de la Subprovincia Mil Cumbres (Provincia Eje Neovolcánico) y drena sus escurrimientos superficiales a la cuenca del río Balsas-Zirándaro, abarcando más del 80% de la superficie del Parque Nacional Cerro de Garnica (82.8%) del estado de Michoacán (Ver Mapa Base<sup>13</sup>).

Muestra un rango de elevación de 1,680 m desde la parte más elevada (en las inmediaciones de Puerto Cabeza Mpio. de Queréndaro 3,160 m s.n.m.) casi hasta su confluencia con el Río San Juan (al suroeste de la localidad Las Ahujas, Municipio de Hidalgo 1,480 m s.n.m.) con un promedio altitudinal de 2,295 m.

Predominan las pendientes pronunciadas, superiores a 10°, en un rango de 0 ° a 75 ° con un promedio de 26 ° (Ver Mapa de clases de pendiente).

Cubre una superficie de 43.94 km<sup>2</sup>, y por el perímetro de 31.1 km que la delimita, se establece que es una cuenca semicircular con cociente Rc= 0.57.

Se presenta una densidad de drenaje 2.72 km/km<sup>2</sup>, ya que existe un canal con una longitud máxima (L) de 13.17 km en la vertiente este. En general el drenaje es dendrítico. El 95 % de las corrientes superficiales son intermitentes, mientras que las corrientes perennes recorren una longitud de 5.4 km en esa misma vertiente, siendo las principales la que nace 600 m al noroeste de la localidad El Tejocote y la que surge 600 m al suroeste de la localidad El Trompillo.

---

<sup>13</sup> Este y todos los mapas referidos en lo sucesivo se encuentran disponible en formato digital con mejor resolución en el Apéndice Cartográfico.












UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO  
 FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES  
 PROGRAMA DE DOCTORADO REGIONAL  
 EN RECURSOS BIÓTICOS

# MAPA BASE

Proyecto: Estructura de la vegetación y unidades de respuesta hidrológica

## SIMBOLOGÍA

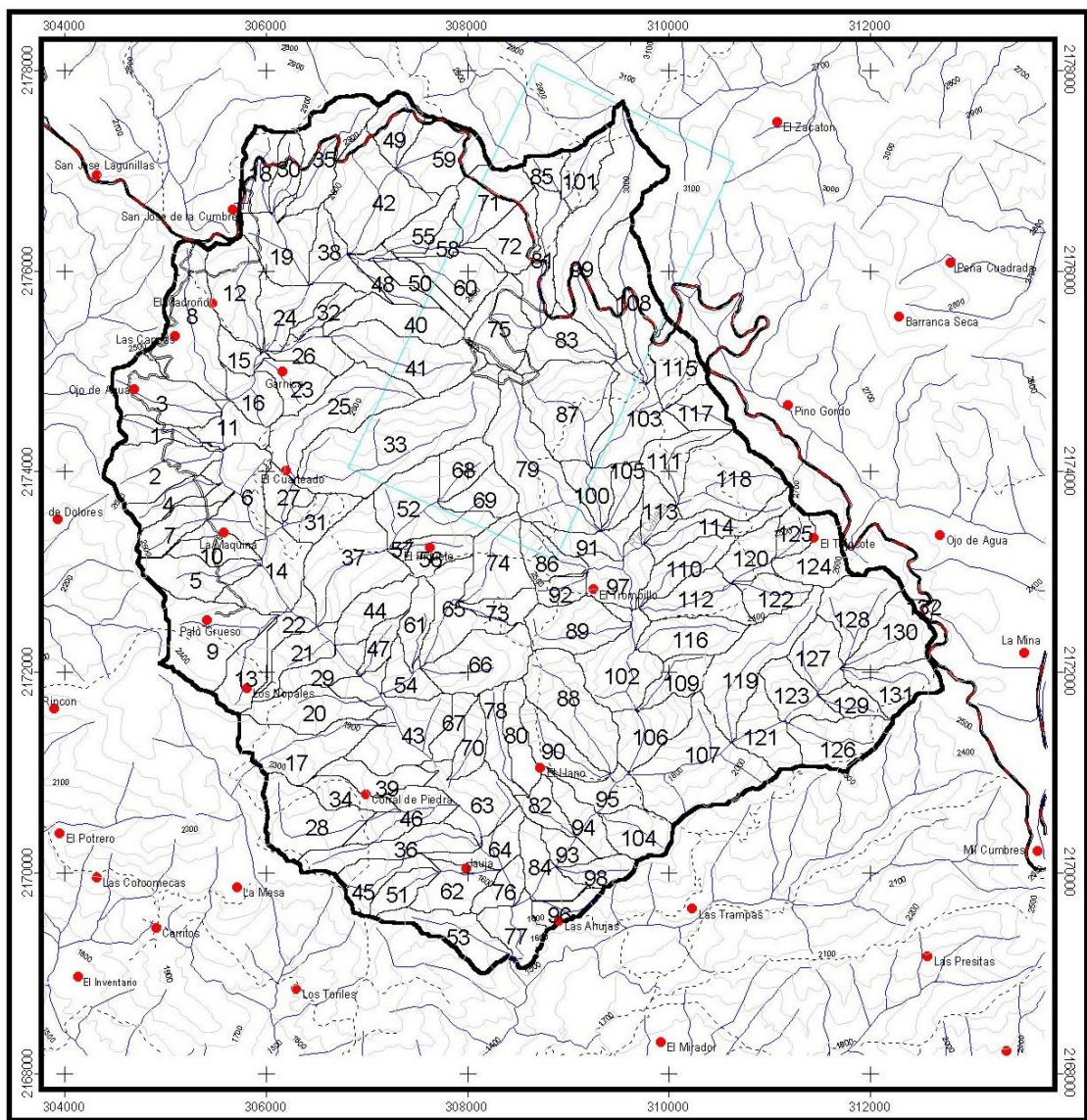
-  Curvas altitudinales cada 100m
-  Área de captación
-  Asentamientos
-  Corrientes superficiales
- Vías de transporte**
  -  Carretera Morelia-MI Cumbres
  -  Terracerías
  -  Veredas
-  Área de estudio
-  Poligon del Parque Nal. Cerro de Garnica



## LOCALIZACIÓN



Elipsode de Clark 1866  
 Proyección Universal Transversa de Mercator  
 Marcas de la retícula UTM cada 2,000 m  
 Datum horizontal ITRF92  
 Fuente: Modelo Vectorial INEGI 1995 y  
 Carta Topográfica E14A24 INEGI 1998.  
 Elaboró: Alfredo Amador García  
 Mayo de 2003



El material geológico predominante son las andesitas y las brecha volcánicas (95% de la superficie), mientras que solo una porción en las inmediaciones de San José de la Cumbre, (Municipio de Queréndaro) está cubierta por rocas ígneas extrusivas ácidas (Figura 4.1).

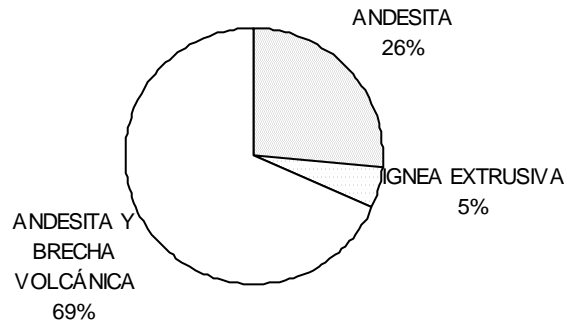


Figura 4.1 Abundancia proporcional de tipos de roca en el Área de Estudio.

Se presentan dos fallas geológicas, la primera tiene dirección suroeste-noreste y se localiza al sur de la localidad Los Nopales (Municipio de Hidalgo) y recorre una longitud de 5.6 km del área. La segunda recorre el área en dirección noroeste-sureste en una longitud de 2.5 km localizándose al este de la localidad Corral de Piedra (Municipio de Hidalgo). Asimismo, se presentan 9 fracturas con diversas direcciones, que suman un total de 15.7 km dentro del área (ver Mapa de Fallas y Fracturas).

Todos los tipos de suelo son de textura media, predominando principalmente los acrisoles, los cuales cubren más del 70% del área de estudio. Sin embargo, en la superficie restante que es considerable, en las inmediaciones del cerro Garnica se presenta Andosoles húmicos.

Por otro lado, el proceso de georeferenciación de las bandas Landsat ETM del año 2000 condujo a la obtención de 4 imágenes cuya ubicación, conforme al modelo vectorial de la carta topográfica e14a24 de INEGI, muestran un error cuadrático medio 5.2 m, lo cual se considera aceptable para la generación de la composición en color (ver Mapa de composición en color), la obtención del NDVI (ver Mapa de

Clases de Índice de Vegetación del año 2000) y en general para el valor de la superficie mínima de la serie cartográfica generada (1:50,000).

Destaca que más del 40 % del área de estudio muestra una densidad de cobertura vegetal con un NDVI de entre 0.4 y 0.5 correspondiente a la clase más alta identificada de este parámetro.

#### 4.1.2 Las áreas de captación (AC)

Fueron delineadas 131 AC en el área de estudio (ver Mapa Base). Muestran superficies variables que van de 0.7 ha a 125 ha de extensión con promedio de 33.5 ha y perímetros que van de 729 m a 8,380 m con promedio de 3,630 m (Apéndice 2).

Presentan diferencias altitudinales (H) en intervalos que van de los 66 m (AC 85) hasta los 897 m (AC 79) con un promedio de 416 m. El parámetro pendiente se presenta con un valor mínimo de 0 ° en todas las AC, adquiriendo valores máximos de 27° (AC 85) a 75° (AC 106). En la mayor parte del área de estudio, las AC presentan una pendiente promedio entre 25 a 40 ° .

El cociente de circularidad **R<sub>c</sub>** pone de manifiesto la abundancia de AC con formas elongadas hasta formas semicirculares, predominando la clase con el intervalo de 0.2 a 0.4 (Mapa de Cociente de Circularidad). Asimismo existen AC aparentemente sin drenaje superficial hasta aquellas con el máximo evaluado en 3.3 km de longitud máxima de canal (AC 33 ) y densidad de drenaje de 9.4 km/km<sup>2</sup> (AC 56), siendo el promedio de L= 0.9 km y Dd=2.8 km/km<sup>2</sup>. La distribución de clases agrupadas de este último parámetro se muestra en el Mapa de Densidad de Drenaje de las AC.

El parámetro Tiempo de Concentración (tc) adquiere valor mínimo a 1 minuto en el AC 39 y un máximo de 17.5 minutos en el AC 99, con valor promedio de 3.8 minutos. La distribución de valores agrupados de tc se muestra en el Mapa de

Tiempo de Concentración, destacando la abundancia de las clases 4 y 5 correspondientes a 4 a 6 y 2 a 4 minutos respectivamente.

Por otro lado, un total de 86 AC que comprenden el 60 % del área de estudio no presentan fallas ni fracturas. Asimismo, 74 AC fueron consideradas de 1er. orden por no recibir corrientes tributarias y cubren una superficie de magnitud similar al conjunto anterior. En el Apéndice 2 se presentan además de otros valores de parámetros físicos, los de longitud de fallas y fracturas y la condición de primer orden, evaluados para cada AC.

#### 4.1.3 Unidades homogéneas

Atendiendo a los criterios de homogeneidad señalados en el apartado 3.4.3, primero se obtuvieron 9 unidades de la sobreposición de tipos de roca y suelo (Mapa de Unidades Lito-edafológicas) de las cuales, aproximadamente el 60% del área de estudio se presentan las combinaciones de Andesitas y Brechas volcánicas con Acrisoles.

Posteriormente, la sobreposición de las clases de NDVI a las unidades lito-edafológicas resulta en una primera aproximación a 47 Unidades de Respuesta Hidrológica Convencional Preliminares (URHCP), entre las que destacan también por pertenecer a la clase de mayor densidad de cobertura vegetal (NDVI de 0.4 a 0.5) y por su abundancia proporcional en el área de estudio, tanto la unidad lito-edafológica de Andesitas y Brechas volcánicas con acrisoles así como la combinación de Andesitas y Brechas volcánicas con Andosoles húmicos en los alrededores de Cerro Garnica.

La combinación de la presencia de fallas o fracturas y la condición de primer orden, se inclina tanto por abundancia proporcional de superficie del área de estudio como por abundancia numérica, al tipo de AC preferidos en los criterios de

selección de sitio para el muestreo experimental, es decir aquellos sin fallas ni fracturas pero de primer orden (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Abundancia proporcional y numérica de AC de primer orden, falladas o fracturadas.

Fallas o fracturas	1er. orden	% del área de estudio	No. de AC
Ausentes	No	16	27
Ausentes	Si	46	59
Presentes	No	24	30
Presentes	Si	14	15

#### 4.1.4 Similitud y agrupación de sitios por el método UPGAM

Para el análisis de Porcentaje de Similitud-UPGAM de los parámetros morfométricos evaluados (ver Apéndice 1), se discriminaron primero a 10 AC que presentan la mayor abundancia proporcional de sus superficies del tipo de URHCP con los mayores valores de NDVI (Mapa de áreas de captación elegibles).

Las características que fueron contrastadas de estas AC emplearon los cocientes sintéticos que incluyen en su evaluación parámetros que no se incorporaron directamente en el análisis, por ejemplo, el cociente Rc sintetiza los parámetros área y perímetro, tc incluye la diferencia altitudinal y la longitud máxima de canal y Dd incluye la longitud total de corrientes y su superficie. Las AC 9 y 13 resultaron con mayor porcentaje de similitud seguidas por los pares 18-30 y 108-75 (Cuadros 4.2 y 4.3).

Cuadro 4.2. Matrices de similitud de las AC evaluadas.

AC	1	9	13	AC	75	85	99	108	AC	12	18	30
1	100			75	100				12	100		
9	75.484	100		85	77.215	100			18	80.531	100	
13	77.241	94.406	100	99	81.565	62.416	100		30	82.394	93.629	100
				108	86.992	68.312	85.476	100				
Nodo	Grupo 1	Grupo 2	% Sim.	Nodo	Grupo 1	Grupo 2	% Sim.		Nodo	Grupo 1	Grupo 2	% Sim.
1	9	13	94.406	1	75	108	86.992		1	18	30	93.629
2	1	Nodo1	76.363	2	Nodo 1	99	83.521		2	12	Nodo 1	81.462
				3	Nodo 2	85	69.314					

Cuadro 4.3. Valores de los parámetros físicos y de densidad de cobertura (NDVI) de los pares de AC evaluadas como más similares mediante el análisis UPGAM.

URHCP ppal.	AC	Pendiente promedio (grados)	STD Pendiente (grados)	Rc	Densidad de drenaje (km/km <sup>2</sup> )	tc (min)
19	9	20.9023	9.8182	0.3141	1.7756	4.3777
19	13	19.3400	11.195	0.3236	2.8285	4.1810
37	75	16.7691	9.6792	0.4015	2.0410	4.4608
37	108	20.8767	10.5114	0.2883	2.9053	8.4829
47	18	17.9154	9.1324	0.3365	4.9687	3.4317
47	30	20.8018	8.6744	0.3687	5.5680	2.6997

Cuadro 4.3 (continuación).

URHCP ppal.	AC	PROPORCIÓN DE TIPOS DE ROCA			PROPORCIÓN DE TIPO DE SUELO			% DE LA CLASE NDVI DE 0.4 A 0.5
		Andesita y brecha volcánica	Andesita	Ignea extrusiva ácida	Acrisol húmico+Acrisol ortico+ Andosol húmico	Acrisol ortico+Regosol distrito+ Litosol	Andosol húmico+Acrisol ortico	
19	9	100	0	0	99	1	0	52
19	13	100	0	0	99	1	0	70
37	75	0	100	0	0	0	100	79
37	108	0	100	0	0	0	100	97
47	18	0	0	100	93	0	0	94
47	30	0	0	100	100	0	0	90

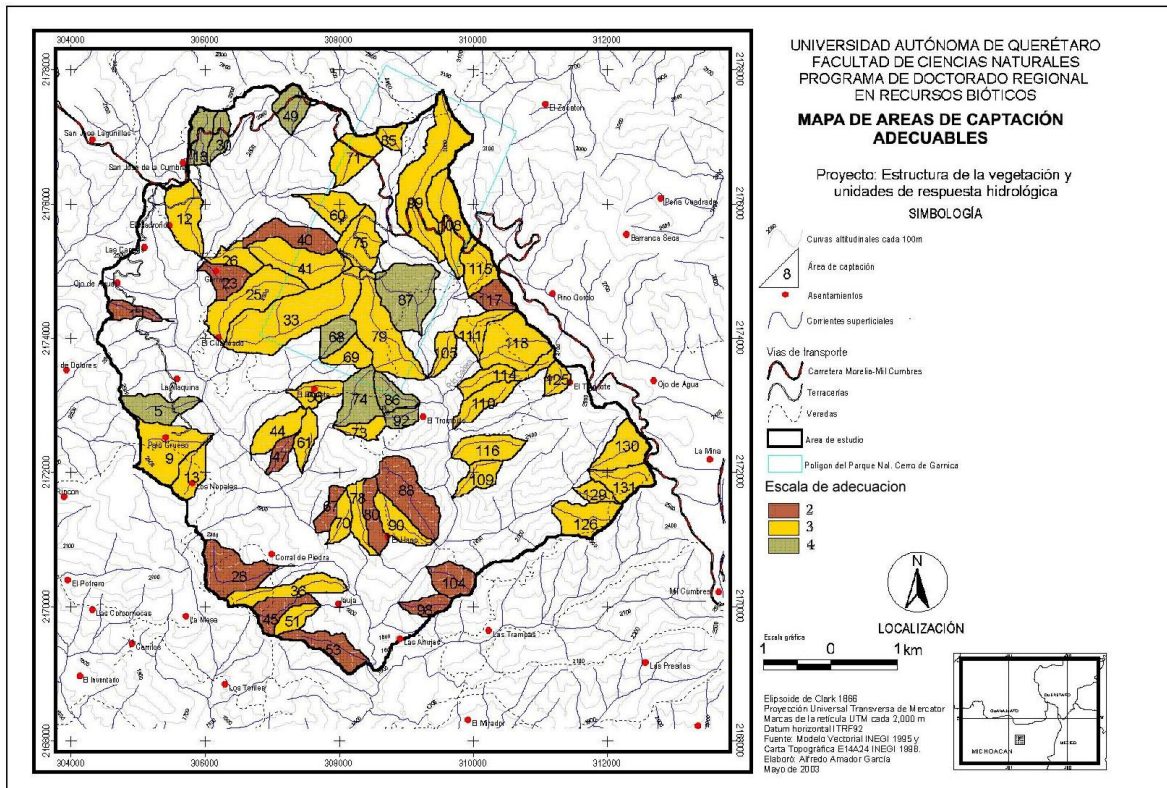
#### 4.1.5 Selección de sitios por Análisis Multicriterio (MCE)

Los valores de clase de los parámetros físicos fueron reclasificados para que los intervalos conteniendo los valores promedio del conjunto de AC, adquirieran los valores de clase más altos. Se incorporó también el criterio de máximo NDVI, extrayendo de la BDG los valores promedio de cada AC y agrupándolos en 4 clases: 0.1 a 0.2 clase 1; 0.2 a 0.3 clase 2; 0.3 a 0.4 clase 3 y 0.4 a 0.5 clase 4.

Los resultados de la ponderación de criterios mostraron una consistencia de 0.05 (aceptable conforme Saaty 1997) estableciéndose los siguientes pesos: NDVI promedio: 0.5128; Pendiente promedio: 0.2615; Rc: 0.1290; Dd: 0.0634 y tc: 0.0333.

El Mapa de Áreas de Captación Adecuables muestra diversas AC que obtienen el valor más alto para la suma lineal ponderada de los criterios adaptados en el análisis multicriterio. Si bien estas expresan la mayor conveniencia o

adecuabilidad desde el punto de vista de los valores promedio de los parámetros evaluados para el conjunto de las AC, solamente el par 18-30 reúne, además: la condición de homogeneidad lito-edafológica.



Ver mapa de áreas de captación adecuables en el anexo cartográfico digital

#### 4.1.6 Unidades de Respuesta Hidrológica Convencionales

Las AC 18 y 30 resultaron ser las más convenientes para el despliegue de los sitios de muestreo experimental, tanto por los dos procedimientos analíticos de selección de sitio aplicados como por los criterios de conveniencia inspeccionados en campo. Si bien estas AC son representativas solo de los basamentos litológicos de roca ígnea con acrisoles en el área de estudio, ambas son representativa de una buena proporción de la Subprovincia Mil Cumbres y dado sus características y proximidad mutua fueron consideradas como el par más apropiado para la implementación de los muestreos experimentales de vegetación y parcelas de escorrimento.

Por otra parte, las 47 URHCP sin clases de pendiente, al incorporársele dicho criterio de segregación mediante cuatro clases de pendiente (0 a 10; 10 a 20, 20 a 30 y más de 30 grados), resulta en un conjunto de 144 URHC (Mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica Convencionales). La multiplicidad de criterios involucrados hasta esta fase resulta en una alta disgregación espacial de las unidades obtenidas, muchas de las cuales no alcanzan la superficie mínima cartografiable dadas las características de la escala de la mayoría de los insumos con que fue generada la serie de productos cartográficos y que a su vez compromete la calidad de los productos a generar en la fase de modelamiento y especialización de los escenarios ambientales.

Debe señalarse que las AC 18 y 30 seleccionadas para los muestreos experimentales son en las que se ubican las URHC 43 y 47 que por una parte denotan solo diferencias entre si en términos de la clase de NDVI (lo que maximiza su aptitud para el contraste de ejercicios mediante los muestreos experimentales a nivel de lotes de escurrimiento), mientras que en el resto de factores analizados son idénticas. Aunado a lo anterior, las URHC mencionadas comprenden la unidades con mayor superficie homogénea continua (5.5 y 4.4% respectivamente) dentro del área lo que a su vez da cuenta de la eventual representatividad de las mismas.

## **4.2 Fase II. Caracterización de la Vegetación en el área de estudio**

### **4.2.1. Comunidades vegetales y su desarrollo en tres décadas**

Fueron elaborados los Mapas de Vegetación y Uso del Suelo de los años 1983, 1994 y 2003 adecuando las categorías de la referencia cartográfica 1:50,000 de INEGI, la fotointerpretación de la ortofoto digital de la misma institución (correspondiente a 1994) y la clasificación supervisada de la subescena Landsat del año 2003 a la nomenclatura jerárquica, fisonómica, climática, estructural y florística que permite la incorporación de hasta 5 criterios de esta índole y que permiten colocar a las distintas comunidades vegetales identificadas en lo que los



sistemas clasificatorios tradicionales mexicanos denominan tipo de vegetación, abarcando lo que dichos sistemas tradicionales así como aquellos llamados fitosociológicos denominan Asociación (ver cuadro 4.4).

I. El Bosque de Oyamel (Bosque Natural Templado Perenne Linearifolio Compacto Alto) es una comunidad que aun se desarrolla en las porciones más altas al noreste del área de estudio, por encima de la cota de los 2,600 m y hasta los 3,300 m, sobre distintas condiciones de exposición, pendiente y tipos de suelo. Se trata de una comunidad netamente de climas templados a fríos dominados por *Abies religiosa* en asociación con *Pinus pseudostrobus*, de cobertura compacta y de individuos con alturas en promedio alrededor de los 30 m. Es una de las comunidades que mas se ha visto afectada en la disminución de su superficie los últimos 30 años y la que más ha contribuido a la expansión del bosque y matorrales antrópicos.

II. Las comunidades de Bosque de Encino (Bosque Natural Templado Perenne Latifolio de distintas coberturas y altura Mediana) se distribuyen principalmente al sur del área de estudio y de manera muy fragmentada en la porción central de la misma. Es una comunidad principalmente compuesta por individuos de la especie *Quercus magnoliifolia* que conforman coberturas abierta y dispersa y que adquiere estabilidad no obstante ser producto en composición y estructura de la extracción de Pino, aunque las comunidades de distribución por debajo de la cota de 1,800 m sobre laderas de exposición sur y suelos someros las que parecen ser las más naturales. Otras comunidades contienen *Q. laurina* 'laurelillo', *Q. rugosa* y *Q. obtusata*.

III. Los Bosques de "hojosas" (Bosque Natural Templado Subperenne Latifolio de distintas coberturas, Alto), están dominados en ciertas áreas por individuos de la especie *Alnus jorullensis*, aunque en condiciones donde el relieve y la existencia de corrientes perennes establecen mayor concentración de humedad y menos exposición a la insolación, la cobertura del estrato arbóreo es compacta, la altura

de los individuos alta, la heterogeneidad de especies es amplia así como las de las formas de vida y los estratos verticales de la comunidad. En tales circunstancias es apropiado señalarlas como “enclaves de Bosque Mesófilo de Montaña” (Rzedowski com. pers.) Aunque esta denominación puede ser discutida, la presencia de Bosque Mesófilo de Montaña también ha sido referida en la literatura para trabajos realizados en la región por Medina y Rodríguez (1995) así como en la cartografía de INEGI (1983), en una localidad fuera del área de estudio a menos de 1 km al Oeste de San José de la Cumbre, entre los 2,500m y 2,700 m y dentro del área de estudio en su porción sureste, en las inmediaciones de la localidad El Tejocote entre los 2,400 m hasta los 2,700 m de altitud. Entre las especies arbóreas-arbustivas de esta comunidad destacan *Styrax argenteus*, *Symplocos prionophylla*, *Cornus disciflora*, *Carpinus caroliniana*, *Buddleia cordata* y *Ternstroemia pringlei*.

El incremento relativo en la abundancia proporcional de estas comunidades dentro del área de estudio en la última década obedece principalmente al reconocimiento de tales tipos de enclaves y a la revisión más o menos meticulosa de las mismas, en virtud de representar las condiciones más heterogéneas en composición y estructura y sobre las que se concentró la instrumentación de AC en la fase III.

IV. Las comunidades de Selva Baja (Bosque Natural Tropical Caduco Latifolio de distintas coberturas y altura, Baja) se circunscriben a la porción más baja del área de estudio, desarrollándose sobre suelos delgados y laderas principalmente de exposición sur. Las condiciones de cobertura abierta y dispersa son las dominantes en tanto que su altura no rebasa los 5 m. Los individuos mas evidentes corresponden a Leguminosas de las especies *Lysiloma acapulscense* y *Acacia penatula*.

Cuadro 4.4. Sistema de clasificación de comunidades vegetales del área de estudio.

DENOMINACIÓN DEL NIVEL DE COMUNIDADES	FORMACIÓN	SUBFORMACIÓN	SERIES DE ASOCIACIONES (TIPO DE VEGETACIÓN)	ESTRUCTURA DE LAS SERIES DE ASOCIACIONES			ASOCIACIÓN	No.	DENOMINACIÓN SINTÉTICA DE RECONOCIMIENTO	Correspondencia con otros sistemas de clasificación de tipos de vegetación de México			
				FISONOMÍA	AFINIDAD CLIMÁTICA	FENOLOGÍA					FORMA PREDOMINANTE DE HOJA	COBERTURA / USO	ALTURA
VEGETACION	BOSQUE NATURAL	TEMPLADO	PERENNE	LINEARIFOLIO	COMPACTO	ALTO	<i>Abies religiosa- Pinus pseudostrobus</i>	I	Oyamel compacto	Bosque de <i>Abies</i> , Rzedowski 1978, Bosque de abetos u oyameles, Miranda y Hernández X. 1963. Bosque de oyamel (incluye ayarín y cedro), I Geografía 2000. Bosque de oyamel, INEGI 1999. Bosque Templado Alto de Linearifolios González-Medrano 2003.			
					LATIFOLIO	DISPERSO	MEDIANO		<i>Quercus magnoliifolia</i>	II	Encino disperso	Bosque de <i>Quercus</i> , Rzedowski 1978. Bosque de encino, I Geografía 2000. Bosque de encino, INEGI 1999. Encinar, Miranda y Hernández X. 1963. Bosque mediano perennifolio de durifolios, González-Medrano 2003. Bosque esclerófilo perennifolio, COTECOCA 1994	
						ABIERTO	MEDIANO		<i>Quercus</i> spp.		Encino abierto		
			COMPACTO	MEDIANO		<i>Quercus</i> spp.	Encino compacto						
			SUBPERENNE	LATIFOLIO	ABIERTO	MEDIANO	<i>Alnus jorullensis-Buddleia cordata</i>	III	Hojosas abierto	Bosque de <i>Alnus</i> , Rzedowski 1978. Bosque templado mediano caducifolio, González-Medrano 2003. Bosque esclerófilo caducifolio, COTECOCA 1994.			
					COMPACTO	ALTO	<i>Quercus laurina- Pinus pseudostrobus</i>		Enclave compacto	Bosque caducifolio, Miranda y Hernández X. 1963. Bosque caducifolio, COTECOCA 1994. Bosque mesófilo de montaña, INEGI 1999. Bosque mesófilo de montaña, I Geografía 2000. Bosque mesófilo de montaña, Rzedowski 1978.			
		TROPICAL	CADUCO	LATIFOLIO	DISPERSO	BAJO	<i>Lysiloma acapulcense-Acacia</i> spp.	IV	Selva baja dispersa	Bosque tropical bajo caducifolio, González-Medrano 2003. Bosque tropical caducifolio, Rzedowski 1978, Selva baja caducifolia y subcaducifolia, I Geografía 2000. Selva baja caducifolia, Miranda y Hernández X. 1963. Selva baja caducifolia, COTECOCA 1994. Selva baja caducifolia, INEGI 1999.			
					ABIERTO	BAJO	<i>Lysiloma acapulcense-Acacia</i> spp.		Selva baja abierta				
					COMPACTO	BAJO	<i>Lysiloma acapulcense-Acacia</i> spp.		Selva baja compacta				
		BOSQUE ANTROPICO	TEMPLADO	PERENNE	ACICULI-LATIFOLIO	DISPERSO	BAJO	<i>Pinus psedostrobus</i>	V	Pino-encino disperso	Bosque aciculi-esclerófilo, COTECOCA 1994. Bosque de pino-encino, INEGI 1999. Bosque de pino-encino (incluye encino-pino), I Geografía 2000. Bosque templado mediano de aciculidurifolios, González-Medrano 2003. Bosque de encino-pino, INEGI 1999.		
ABIERTO	MEDIANO					<i>Pinus- Ternstroemia</i>	Pino-encino abierto						
COMPACTO	ALTO					<i>Pinus-Quercus</i>	Pino-encino compacto						
MATORRAL ANTROPICO	EURICLIMATICO	PERENNE	HETEROFILO	HETEROGENEO	MEDIANO	<i>Baccharis conferta-B. salicifolia</i>	VI	Matorral					
HERBAZAL ANTROPICO	EURICLIMATICO	PERENNE	ANGUSTIFOLIO	HETEROGENEO	MEDIANO	---	VII	Pastizal	Pastizal inducido (INEGI 1999)				
USO				AGRICOLA		---	VIII	Uso agrícola					
				HABITACIONAL		---	IX	Población					

La presencia de este tipo de comunidades se considera natural no obstante el fuerte impacto antrópico que para fines pecuarios es objeto, pero que dadas principalmente características de un relieve con fuerte pendiente no ha sido del todo desplazada para otros usos y si en cambio es sujeta recurrentemente a modificaciones en su estructura.

V. Los Bosques de Pino-encino (y Encino-Pino) (Bosque Antrópico Templado Aciculi-Latifolio de distintas coberturas y alturas) son las comunidades más apreciadas por los habitantes locales por la diversidad de productos y subproductos que de ellos obtienen, por lo que en el lapso de observación de tres décadas en este trabajo se señala como bosques antrópicos. Se han distribuido desde las partes bajas hasta las partes altas del área y su dinámica de restitución es relativamente rápida ya que porciones interpretables como desprovistas de vegetación arbórea en la ortofoto de 1994, fueron observadas que sostenían una abundante regeneración de *Pinus* de hasta 7 m de altura durante los recorridos en 2003. En general son comunidades de abiertas a compactas de altura mediana y las principales especies en el área son *Pinus pseudostrobus* así como *P. montezumae* y *P. teocote*, intercalándose en dominancia con las especies asentadas de encino, principalmente *Quercus laurina*.

VI. El Matorral (Matorral Antrópico Euriclimático Perenne Heterófilo Heterogéneo) lo componen en realidad una serie de asociaciones entre las que destacan las de especies de *Baccharis* (*B. conferta* y *B. salicifolia*) en las porciones del área correspondientes netamente a climas templados, en tanto que la composición es muy heterogénea en las porciones derivadas de la perturbación a comunidades tropicales y sus partes transicionales con las áreas templadas. En ambos casos la altura es mediana y su cobertura varía dependiendo del tipo, la intensidad y la frecuencia a las actividades de perturbación entre las que destaca el arrastre de troncos derivados de los aprovechamientos forestales, el pastoreo y la expansión-contracción de terrenos agrícolas. La dinámica de transición de estas comunidades parece más acelerada en las estimaciones de cambio a lo largo del

periodo de observación y llama la atención que ocupa el segundo lugar en importancia en la superficie proporcional del área, semejándose el comportamiento de su ocupación en el área de manera inversa a la del Bosque de Aciculi-Latifolios (Figura 4.2).

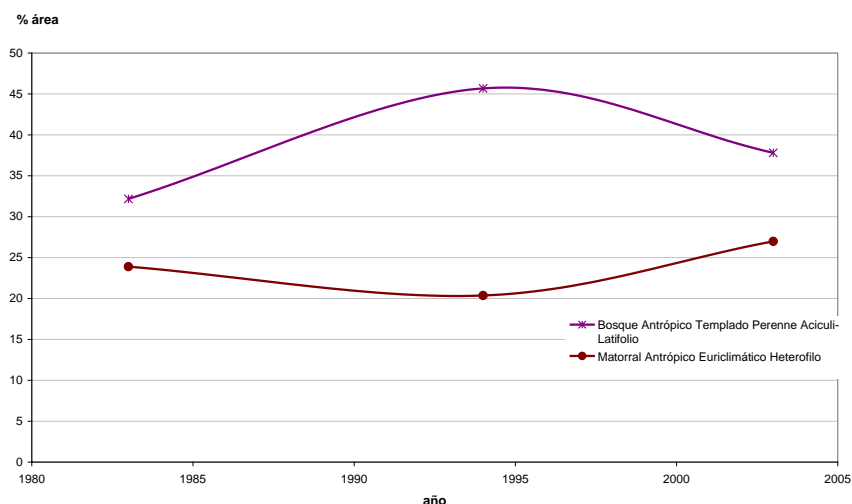


Figura 4.2. Cambios en la abundancia proporcional de las comunidades antrópicas con mayor superficie en el área de estudio.

VII. El Pastizal inducido (Herbazal Antrópico Euriclimático Perenne Angustifolio Heterogéneo) constituye también una serie de asociaciones vegetales caracterizadas en este caso por la dominancia de gramíneas tanto en condiciones templadas como tropicales y cuya dinámica se encuentra altamente vinculada con los cambios y el establecimiento gradual de comunidades arbóreas y arbustivas. Dicha dinámica, sin embargo, se percibe para el pastizal ligada al menos en magnitud y comportamiento muy similar pero inversa a la expansión de terrenos agrícolas (Figura 4.3 y Cuadro 4.5).

El decremento relativo en la superficie de estas comunidades seguramente es compensado con las prácticas culturales para el manejo del ganado que de tiempo atrás viene desplegándose de manera extensiva en las diferentes comunidades vegetales aún en terrenos de pendiente muy pronunciada.

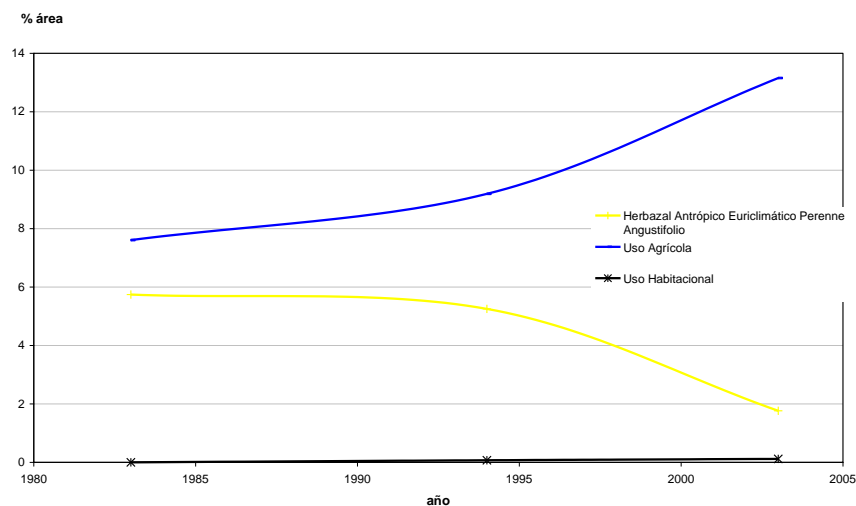


Figura 4.3. Cambios en la abundancia proporcional de pastizales inducidos y terrenos de uso agrícola en el área de estudio.

VIII y IX. Uso agrícola y Uso habitacional. El primero constituye la categoría de mayor crecimiento proporcional en las últimas 3 décadas en el área y en ella fueron observados desde zonas de agricultura de temporal con maíz, veza de invierno, chícharo, frijol, calabaza, haba, hasta huertos semipermanentes de frutales en los que el manejo de los afloramientos de agua son aprovechados a manera de agricultura de riego.

Las técnicas de labranza empleadas son las tradicionales, mismas que implican el barbecho y la preparación del suelo para la siembra así como los deshierbes manuales o mediante el uso de agroquímicos por lo que, al menos al principio de cada temporada de lluvia, muchos terrenos para este fin presentan suelo desnudo. Las áreas de uso habitacional se distinguen así de las denominadas “áreas urbanas” dado que en la primera es evidente la carencia de servicios e infraestructura mínima asociadas con el último concepto, principalmente los relacionados con la obtención, distribución de agua potable y redes de drenaje así como alcantarillado para la disposición de descargas domésticas domiciliarias.

Comprende una porción marginal de la localidad de San José de la Cumbre, misma que en el lapso de observación no mostró incrementos significativos en superficie (ver mapas de vegetación y uso del suelo 1983, 1994 y 2003).

Cuadro 4.5. Matrices de transición de cambios de vegetación y usos de suelo en el área de estudio de 1983 a 1994 y de 1994 a 2003. Los valores enteros del 1 al 9 en color blanco representan los tipos de vegetación y uso del suelo (1. Bosque Natural Templado Perenne Linearifolio; 2. Bosque Natural Templado Perenne Latifolio; 3. Bosque Natural Templado Subperenne Latifolio; 4. Bosque Natural Tropical Caduco Latifolio; 5. Bosque Antrópico Templado Perenne Aciculi-Latifolio; 6. Matorral Antrópico Euriclimático Heterofilo; 7. Herbazal Antrópico Euriclimático Perenne Angustifolio; 8. Uso Agrícola; 9. Uso Habitacional). La superficie proporcional de un tipo de vegetación al principio de un periodo se lee al final de las columnas y su estado al final del siguiente periodo se lee al final de los renglones.

		1983									%
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1994	1	9.32	0.00	0.00	0.00	0.46	0.42	0.32	0.17	0.00	<b>10.69</b>
	2	0.01	1.61	0.00	0.28	2.62	1.61	0.06	0.42	0.00	<b>6.62</b>
	3	0.13	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	<b>0.19</b>
	4	0.00	0.08	0.00	0.88	0.11	0.46	0.36	0.06	0.00	<b>1.94</b>
	5	8.41	1.47	0.52	0.60	20.37	10.84	1.69	1.76	0.00	<b>45.66</b>
	6	0.88	3.15	0.10	0.90	5.79	6.22	1.33	2.01	0.00	<b>20.38</b>
	7	0.10	0.57	0.00	0.34	1.51	1.81	0.45	0.47	0.00	<b>5.25</b>
	8	0.32	0.56	0.00	0.37	1.26	2.49	1.53	2.65	0.00	<b>9.19</b>
	9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.05	0.00	<b>0.08</b>
%	<b>19.16</b>	<b>7.45</b>	<b>0.62</b>	<b>3.36</b>	<b>32.17</b>	<b>23.89</b>	<b>5.75</b>	<b>7.60</b>	<b>0.00</b>	<b>100</b>	

		1994									%
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
2003	1	6.93	0.00	0.06	0.00	1.49	0.15	0.05	0.01	0.00	<b>8.69</b>
	2	0.00	1.99	0.00	0.21	4.54	1.37	0.12	0.02	0.00	<b>8.25</b>
	3	0.05	0.00	0.09	0.00	0.71	0.04	0.00	0.00	0.00	<b>0.89</b>
	4	0.00	0.21	0.00	0.60	0.14	0.86	0.52	0.02	0.00	<b>2.35</b>
	5	3.27	0.98	0.04	0.00	28.47	4.28	0.73	0.09	0.01	<b>37.87</b>
	6	0.34	2.87	0.00	0.59	8.83	11.30	2.84	0.18	0.00	<b>26.96</b>
	7	0.01	0.18	0.00	0.17	0.21	0.68	0.41	0.01	0.00	<b>1.66</b>
	8	0.09	0.39	0.00	0.37	1.23	1.68	0.58	8.86	0.00	<b>13.21</b>
	9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.06	<b>0.12</b>
%	<b>10.68</b>	<b>6.62</b>	<b>0.19</b>	<b>1.94</b>	<b>45.66</b>	<b>20.38</b>	<b>5.25</b>	<b>9.19</b>	<b>0.08</b>	<b>100</b>	

#### 4.2.2 Comunidades vegetales de las AC experimentales

Dentro de la AC experimentales fueron identificadas 77 especies comprendidas en 63 géneros y 35 familias y 63 géneros, 13 especies correspondieron a árboles, 26 especies a arbustos, 28 especies a hierbas y 10 especies entre parásitas, trepadoras y epifitas (ver Apéndice 4).

Siguiendo con la propuesta de sistema clasificatorio de comunidades vegetales antes señalado, fueron reconocidas 8 asociaciones (Figura 4.4): El Bosque Natural Templado Perenne Linearifolio (oyamel) fue caracterizado con 8 sitios de muestreo. Se presenta principalmente en las porciones de mayor elevación, ocupando menos del 2 % respectivamente de cada AC. Son comunidades de cobertura compacta (170 individuos/ha, área basal de aproximadamente 105 m<sup>2</sup>/ha, cobertura de copa de 124 m<sup>2</sup>/indiv. en promedio y porosidad óptica de 18.4%. Su altura alcanza los 30 m y la profundidad de sus copas mide en promedio 12 m. Como fue señalado en la metodología, se consideran para el cálculo del índice de valor de importancia (i.v.i.) a los valores relativos de frecuencia, densidad y cobertura (esta última por área basal), no obstante, en lo sucesivo los cuadros referentes a las distintas comunidades presentan también los valores relativos de cobertura de la copa y de la profundidad de la misma tanto del estrato arbóreo como del arbustivo (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. Valores relativos y de importancia de la comunidad de oyamel.

ARBOLES	dens. relativa	cob. relativa	a basal relativa	prof.cop relativa	frec. relativa	i.v.i
<i>Abies religiosa</i>	0.21	0.21	0.21	0.28	0.25	0.67
<i>Pinus pseudostrabus</i>	0.06	0.32	0.61	0.29	0.25	0.92
<i>Quercus laurina</i>	0.25	0.43	0.17	0.32	0.33	0.75
<i>Temstroemia pringlei</i>	0.48	0.04	0.01	0.11	0.17	0.66
ARBUSTOS						
<i>Baccharis conferta</i>	0.01	0.28	0.2	0.18	0.08	0.29
<i>Cestrum thyrsoideum</i>	0.03	0.06	0.2	0.17	0.08	0.31
<i>Cirsium ehrenbergii</i>	0.12	0.04	0.11	0.03	0.18	0.41
<i>Salvia lavanduloides</i>	0.68	0.01	0	0.13	0.08	0.76
<i>Senecio angulifolius</i>	0.02	0.54	0.28	0.21	0.5	0.8
<i>Styrax argenteus</i>	0.14	0.07	0.21	0.28	0.08	0.43

El Bosque Natural Templado Subperenne Latifolio de cobertura abierta y altura mediana (Hojosas), ocupa entre un 17 y un 20 % de las AC 18 y 30



respectivamente. Se localiza principalmente al sur de la carretera federal y es evidente que su estructura obedece a intensos procesos de perturbación. Fue caracterizada a partir de la información de 22 sitios de muestreo de los cuales resulta una densidad de 82 árboles/ha y cerca de 1,500 arbustos/ha. El área basal es de apenas 7 m<sup>2</sup>/ha y en promedio sus individuos presentan una copa de 49 m<sup>2</sup>. No obstante, esta comunidad mostró una porosidad óptica de su dosel del 32%, con una altura y profundidad promedio de 12 y 6.3 m respectivamente. Los valores relativos de cobertura y profundidad de copa así como los requeridos para la estimación del valor de importancia se presentan en el cuadro 4.7.

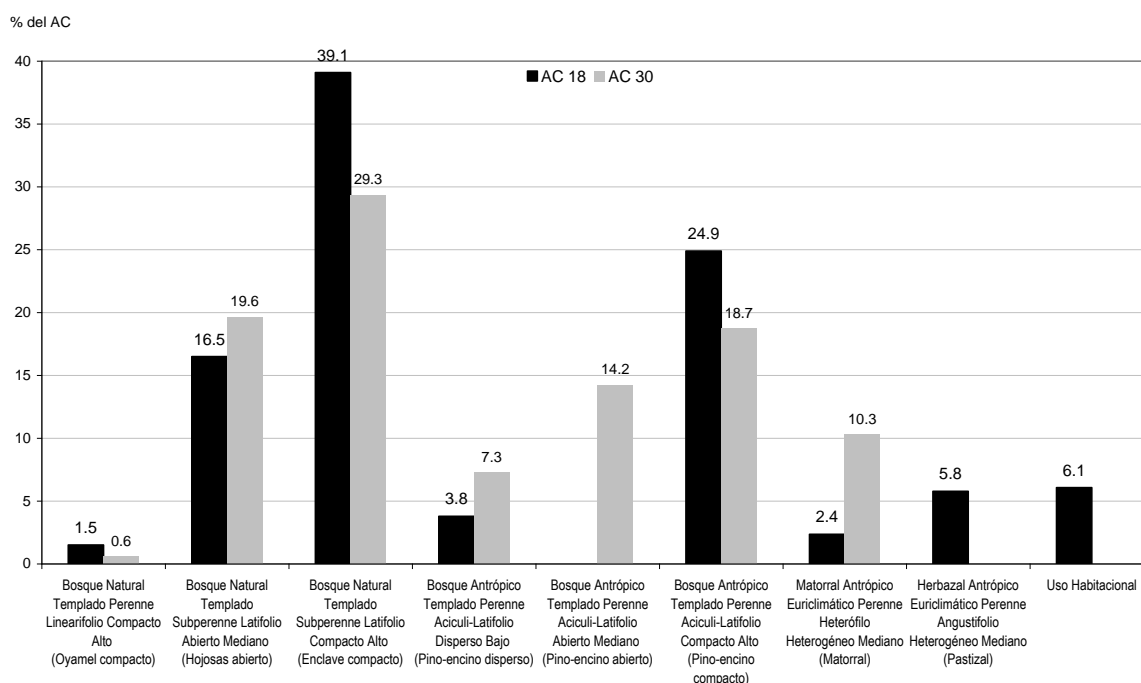


Figura 4.4. Abundancia proporcional de las distintas comunidades vegetales y su estructura en las AC experimentales.

El Bosque Natural Templado Subperenne Latifolio compacto y alto (Enclave mesófilo compacto) ocupa casi el 40 y el 30% respectivamente de las AC experimentales, localizado en las partes adyacentes a las corrientes de agua y sobre las laderas de menor exposición. Fue caracterizado a partir del análisis de 14 sitios de muestreo de los cuales se desprende una densidad de 421 indiv./ha, en promedio presentan una copa de 37m<sup>2</sup>.

Cuadro 4.7. Valores relativos y de importancia de la comunidad de Hojasas.

<b>ARBOLES</b>	dens. relativa	cob. relativa	a_b relativa	prof.cop relativa	frec. relativa	i.v.i
<i>Alnus jorullensis</i>	0.26	0.37	0.34	0.19	0.25	0.85
<i>Buddleia cordata</i>	0.16	0.22	0.14	0.09	0.17	0.47
<i>Ceanothus coeruleus</i>	0.08	0.06	0.16	0.07	0.08	0.32
<i>Bocconia frutescens</i>	0.09	0.01	0.04	0.06	0.08	0.21
<i>Pinus pseudostrobus</i>	0.25	0.09	0.06	0.11	0.25	0.56
<i>Quercus laurina</i>	0.08	0.21	0.21	0.28	0.08	0.37
<i>Solanum cervantesii</i>	0.08	0.04	0.05	0.2	0.09	0.22
<b>ARBUSTOS</b>						
<i>Alnus jorullensis</i>	0.2	0.09	0.26	0.01	0.08	0.54
<i>Ageratina mairetiana</i>	0.2	0.01	0.02	0.06	0.17	0.39
<i>Pinus michoacana var. comuta</i>	0.08	0.76	0.52	0.49	0.08	0.68
<i>Rumfordia floribunda</i>	0.03	0.02	0.04	0.15	0.08	0.15
<i>Salvia lavanduloides</i>	0.14	0.01	0	0.03	0.17	0.31
<i>Senecio angulifolius</i>	0.09	0.09	0.13	0.13	0.17	0.39
<i>Solanum cervantesii</i>	0.11	0.01	0.02	0.09	0.17	0.3
<i>Urtica mexicana</i>	0.15	0.01	0.01	0.04	0.08	0.24

El área basal de esta comunidad es de 102 m<sup>2</sup>/ha y su porosidad óptica es de 27 % en promedio, aunque en el punto donde fueron establecidos los lotes experimentales la porosidad óptica era de 0%. La altura fue estimada en un rango de 6 a 31 m, mostrando una profundidad de copas de 7 m. Los valores relativos de cobertura de la copa y de la profundidad de la misma tanto del estrato arbóreo como del arbustivo y el i.v.i. se señalan en el Cuadro 4.8)

Cuadro 4.8. Valores relativos y de importancia de la comunidad de enclave mesófilo.

<b>ARBOLES</b>	dens. relativa	cob. relativa	a_b relativa	prof.cop relativa	frec. relativa	i.v.i
<i>Alnus jorullensis</i>	0.26	0.37	0.34	0.19	0.25	0.85
<i>Buddleia cordata</i>	0.16	0.22	0.14	0.09	0.17	0.47
<i>Ceanothus coeruleus</i>	0.08	0.06	0.16	0.07	0.08	0.32
<i>Bocconia frutescens</i>	0.09	0.01	0.04	0.06	0.08	0.21
<i>Pinus pseudostrobus</i>	0.25	0.09	0.06	0.11	0.25	0.56
<i>Quercus laurina</i>	0.08	0.21	0.21	0.28	0.08	0.37
<i>Solanum cervantesii</i>	0.08	0.04	0.05	0.2	0.09	0.22
<b>ARBUSTOS</b>						
<i>Alnus jorullensis</i>	0.2	0.09	0.26	0.01	0.08	0.54
<i>Ageratina mairetiana</i>	0.2	0.01	0.02	0.06	0.17	0.39
<i>Pinus michoacana var. comuta</i>	0.08	0.76	0.52	0.49	0.08	0.68
<i>Rumfordia floribunda</i>	0.03	0.02	0.04	0.15	0.08	0.15
<i>Salvia lavanduloides</i>	0.14	0.01	0	0.03	0.17	0.31
<i>Senecio angulifolius</i>	0.09	0.09	0.13	0.13	0.17	0.39
<i>Solanum cervantesii</i>	0.11	0.01	0.02	0.09	0.17	0.3
<i>Urtica mexicana</i>	0.15	0.01	0.01	0.04	0.08	0.24

El Bosque Antrópico Templado Perenne Aciculi-Latifolio disperso bajo (pino-encino dispersa) fue caracterizado a partir de 6 sitios de muestreo que corresponde a áreas de regeneración de pino localizadas en la parte norte de ambas AC. Cubre respectivamente el 4 y el 7 % de la superficie de dichas AC. Es una comunidad dispersa, vista en perspectiva desde una elevación topográfica y vista en su interior en los recorridos ya que son contados individuos de porte arboreo los que la conforman. Presenta densidades de hasta 705 indiv/ha. Sin embargo la estimación de área basal es de apenas 58 m<sup>2</sup>/ha dado que en promedio sus individuos no alcanzan los 17 cm de diámetro en la base. Asimismo, la cobertura de sus copas es de 28 m<sup>2</sup>/indiv. en promedio y la porosidad óptica que se establece es de 28%. Aunque se presentan individuos de hasta 22 m, en promedio esta comunidad presenta 12 m siendo frecuentes los valores inferiores a 10 m. Por lo anterior, no resulta sorprendente que la profundidad promedio de sus copas fluctúe alrededor de los 4 m. El cuadro 4.9 muestra una síntesis de los valores relativos de estos parámetros.

Cuadro 4.9. Valores relativos y de importancia de la comunidad de pino-encino dispersa.

ARBOLES	dens. relativa	cob. relativa	a basal relativa	prof.cop relativa	frec. relativa	i.v.i
<i>Alnus jorullensis</i>	0.45	0.51	0.56	0.49	0.15	1.16
<i>Pinus pseudostrabus</i>	0.55	0.49	0.44	0.51	0.85	1.84
ARBUSTOS						
<i>Acaena elongata</i>	0.06	0.01	0.02	0.05	0.1	0.18
<i>Cestrum thyrsoideum</i>	0.02	0.02	0.02	0.03	0.1	0.14
<i>Crataegus mexicana</i>	0.05	0.57	0.35	0.23	0.15	0.55
<i>Pinus pseudostrabus</i>	0.76	0.19	0.26	0.26	0.1	1.12
<i>Salvia lavanduloides</i>	0.05	0.03	0.21	0.13	0.25	0.51
<i>Senecio angulifolius</i>	0.06	0.18	0.14	0.3	0.3	0.5

El Bosque Antrópico Templado Perenne Aciculi-Latifolio abierto mediano (pino-encino abierto) se localiza en la porción noreste del AC 30 ocupando poco más del 14% de su superficie y mostrándose ausente en la AC18. Fue muestreado con 12 sitios de los que se obtuvo una densidad de aproximadamente 597 individuos/ha (árboles) y más de 3 mil arbustos/ha.

Corresponde probablemente a una zona transicional entre las condiciones de tres comunidades, las de hojosas, las de regeneración de pino y las propiamente de

pino-encino. Esto se deja ver también en la composición florística de la comunidad (Cuadro 4.10) y en las magnitudes de sus parámetros estructurales como área basal (48.2 m<sup>2</sup>/ha), cobertura de copa (47 m<sup>2</sup>/indiv.) y altura y profundidad de copas promedio (11 y 6 m respectivamente). Asimismo, la porosidad óptica de su dosel fue estimada en 26.5%.

Cuadro 4.10. Valores relativos y de importancia de la comunidad de pino-encino abierto.

ARBOLES	dens. relativa	cob. relativa	a_basal relativa	prof.cop relativa	frec. relativa	i.v.i
<i>Alnus jorullensis</i>	0.15	0.26	0.3	0.17	0.25	0.7
<i>Pinus pseudostrobus</i>	0.08	0.5	0.62	0.33	0.5	1.2
<i>Styrax argenteus var. ramirezii</i>	0.23	0.07	0.05	0.19	0.08	0.36
<i>Temstroemia pringlei</i>	0.54	0.17	0.03	0.31	0.17	0.74
ARBUSTOS						
<i>Rumfordia floribunda</i>	0.06	0.24	0.14	0.27	0.08	0.28
<i>Salvia lavanduloides</i>	0.05	0.04	0.08	0.33	0.17	0.3
<i>Senecio angulifolius</i>	0.17	0.24	0.14	0.08	0.08	0.39
<i>Symplocos prionophyla</i>	0.68	0.07	0	0.08	0.08	0.76
<i>Temstroemia pringlei</i>	0.04	0.41	0.64	0.24	0.59	1.27

El Bosque Antrópico Templado Perenne Aciculi-Latifolio compacto alto (pino-encino compacto) fue caracterizado a partir de 16 sitios de muestreo. Esta comunidad se distribuye en el margen oeste del AC18 cubriendo un 25 % de su superficie, y en el margen este del AC30 cubriendo un 19 % de su superficie respectivamente. Es considerada una comunidad compacta no obstante su densidad de individuos oscile alrededor de 154 por ha. Presenta individuos de porte maduro con un área basal promedio de 97 m<sup>2</sup>/ha pues el diámetro de sus bases frecuentemente rebasa el metro de magnitud, mientras que el área de sus copas fluctúa alrededor de 149 m<sup>2</sup>/indiv. Su altura frecuentemente se aproxima a 30 m, siendo su promedio de 21. La profundidad de copas es de alrededor de 10 m y la porosidad óptica de dosel fue estimada en 32% (Cuadro 4.11).

Esta comunidad como la de oyamel presentan un estrato arbustivo relativamente menos desarrollado que el resto de las comunidades descritas, tanto en su composición como en la magnitud de los parámetros estructurales que lo hacen eventualmente susceptible de interceptar lluvia.

Cuadro 4.11. Valores relativos y de importancia de la comunidad de pino-encino compacto.

ARBOLES	dens. relativa	cob. relativa	a basal relativa	prof.cop relativa	frec. relativa	i.v.i
<i>Alnus jorullensis</i>	0.02	0.11	0.15	0.26	0.18	0.35
<i>Pinus pseudostrobus</i>	0.02	0.63	0.58	0.38	0.68	1.28
<i>Quercus laurina</i>	0.02	0.24	0.26	0.32	0.1	0.38
<i>Ternstroemia pringlei</i>	0.94	0.02	0.01	0.04	0.04	0.99
ARBUSTOS						
<i>Berberis moranensis</i>	0.17	0.04	0.17	0.09	0.04	0.38
<i>Ageratina maireriana</i>	0.05	0.03	0.04	0.07	0.04	0.13
<i>Rubus liebmannii</i>	0.22	0	0.17	0	0.04	0.43
<i>Salvia purpurea</i>	0.16	0.32	0.1	0.23	0.09	0.35
<i>Salvia lavanduloides</i>	0.22	0.06	0.07	0.36	0.36	0.65
<i>Senecio angulifolius</i>	0.05	0.47	0.33	0.18	0.39	0.77
<i>Ternstroemia pringlei</i>	0.13	0.08	0.12	0.07	0.04	0.29

El Matorral Antrópico Perenne Euriclimático Heterófilo de cobertura heterogénea y altura media (Matorral de *Baccharis*) constituyen en las AC experimentales fundamentalmente matorrales de *Baccharis*. Se distribuye a manera de boquetes en las AC 18 y 30, donde ocupa –respectivamente- el 2 y el 10 % de su superficie. Se trata de una comunidad sin estrato arbóreo y por tanto con 100% de porosidad óptica de dosel a la altura estándar en que se evaluó este parámetro (altura de 1.3 m). El análisis a 8 sitios de muestreo muestra que estas comunidades pueden llegar a contener densidades de hasta 1,400 individuos/ha que –sin embargo- cubren menos de 1 m<sup>2</sup>/ha con su área basal y la profundidad de copa en este caso fluctúa alrededor de 1 m. Sus valores relativos y de importancia se presentan en el cuadro 4.12.

Cuadro 4.12. Valores relativos y de importancia del Matorral de *Baccharis*.

ARBUSTOS	dens. relativa	cob. relativa	a_b relativa	prof.copa relativa	frec. relativa	i.v.i
<i>Baccharis conferta</i>	0.43	0.37	0.48	0.33	0.5	1.41
<i>Acaena elongata</i>	0.51	0.06	0.04	0.17	0.25	0.8
<i>Baccharis salicifolia</i>	0.06	0.57	0.48	0.5	0.25	0.79

### 4.3 Fase III. Instrumentación de AC y lotes de escurrimiento experimentales.

4.3.1 Tormentas de diseño y diseño-construcción de los vertedores en las AC. De 5 estaciones meteorológicas ubicadas en las proximidades del área de estudio, solo 3 tienen depositada información meteorológica para periodos consecutivos

mayores a 30 años en el sistema ERIC II (SMN-IMTA 2000, que reúne los registros históricos diarios de las estaciones meteorológicas del país).

La estación 16235 (Huajúmbaro) se localiza a solo 12 km al Este de las AC, sin embargo solo dispone de una serie de registros de 4 años. La estación 16136 (Tzitzio) se localiza aproximadamente a 14 km al Suroeste de las AC pero dispone solo de registros por 17 años. Las estaciones 16096 Presa Malpais (19.75° N 100.88° W 1,831 m s.n.m. Periodo: 1944-1985), 16097 Presa Pucuató (19.63° N 100.7°W 2,505 m s.n.m. Periodo: 1950-1984) y 16098 Presa Sabaneta (19.62° N 100.68° W 2,513 m s.n.m. Periodo: 1953-1984) además de disponer de suficientes registros continuos (41, 34 y 31 años respectivamente) se localizan a menos de 20 km de las AC, destacando la estación Presa Malpaís ubicada a solo 8 km al N pero con una diferencia altitudinal de más de 400 m de esta estación con respecto a las AC experimentales.

La información con que fueron generados los diagramas precipitación (mm) vs. Temperatura (°C) (escala 1:2) de las tres últimas estaciones señaladas se muestran en la figura 4.5. Se observa una diferencia amplia en la precipitación total anual entre las 2 estaciones situadas por encima de los 2,000 m s.n.m. con más de 1,000 mm anuales y la estación ubicada a solo 8 km del área pero 800 m por debajo de la cota altitudinal de la salida de las AC. En las tres estaciones el mayor porcentaje de la precipitación anual se concentra en los meses de verano siendo el mes de Julio el más lluvioso y Marzo el mes más seco respectivamente. Asimismo, la temperatura media anual fluctúa entre los 9.3°C y 12.7°C mostrando diferencias entre los meses más caliente y más frío de 8.8 a 9.6 °C respectivamente. Ello concuerda con la fórmula climática de estas estaciones definida por García (2003) (Cuadro 4.13).

Cuadro 4.13. Fórmulas climáticas y promedio de precipitación en las estaciones cercanas al área de estudio.

<b>ESTACIÓN</b>	<b>CLIMA</b>	<b>pp promedio</b>
P. MALPAIS	Cb(w2)(w)(i)g	678 mm (41 años)
P. PUCUATO	Cb(wo)(w)(l)g	1,287.65 mm (34 años)
P. SABANETA	Cb(w2)(w)(i)	1,344.5 mm (31 años)

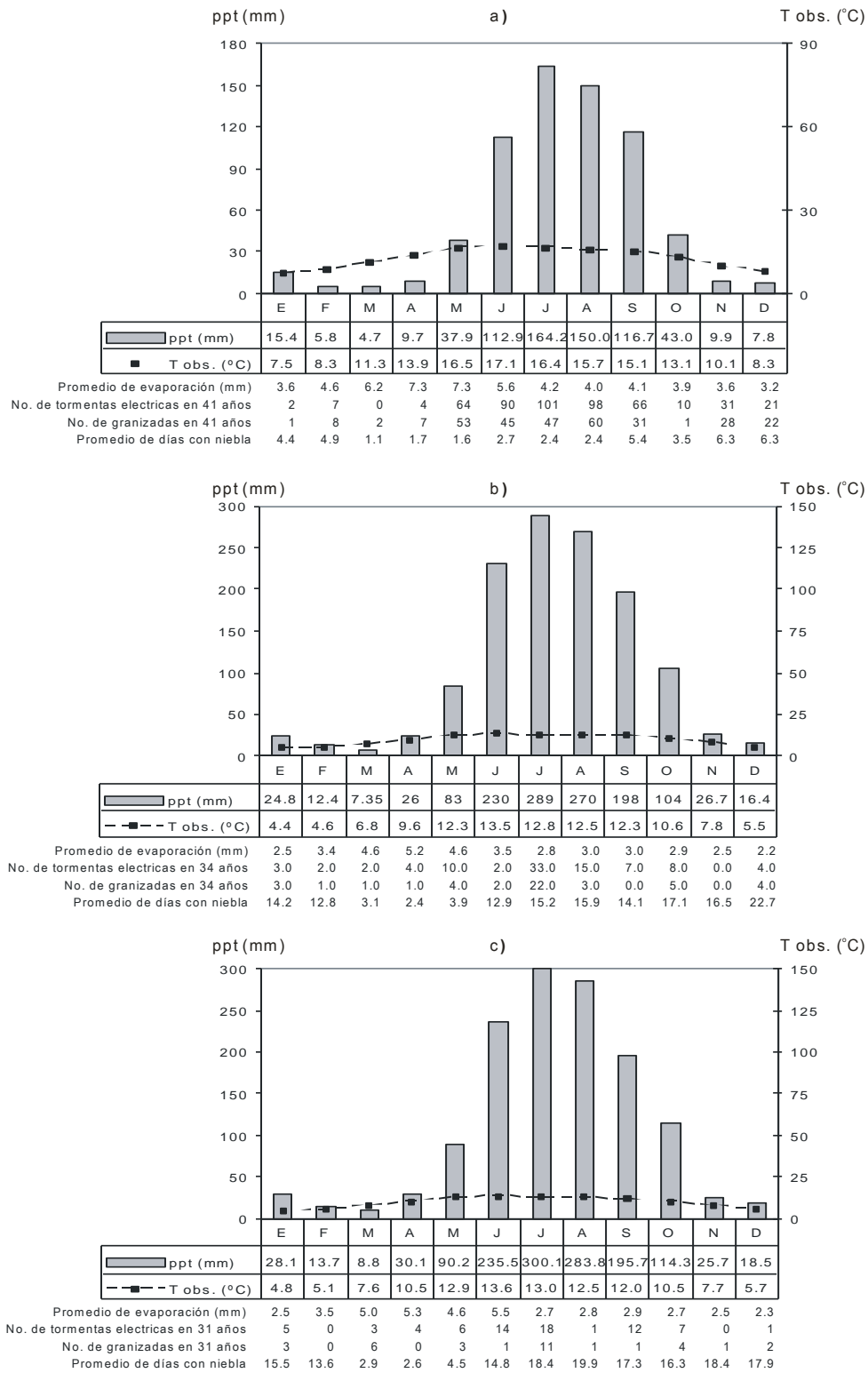


Figura 4.5. Diagramas precipitación vs. temperatura y periodicidad de otros eventos registrados en las estaciones cercanas al área de estudio: a) 16096 P. Malpaís. b) 16097 P. Pucuató y c) 16098 P. Sabaneta.

Por otra parte, la información concerniente a precipitación máxima (pp máx.) en 24 hrs. (8:00 a.m. a 8:00 p.m.) fue analizada en series de tiempo anual y mensual para obtener los registros de la magnitud de valores extremos históricos y el rango modal. El área de mayor concentración bajo la curva de probabilidad de la magnitud de los eventos de pp máx. en 24 hrs se muestra en las Figuras 4.6.

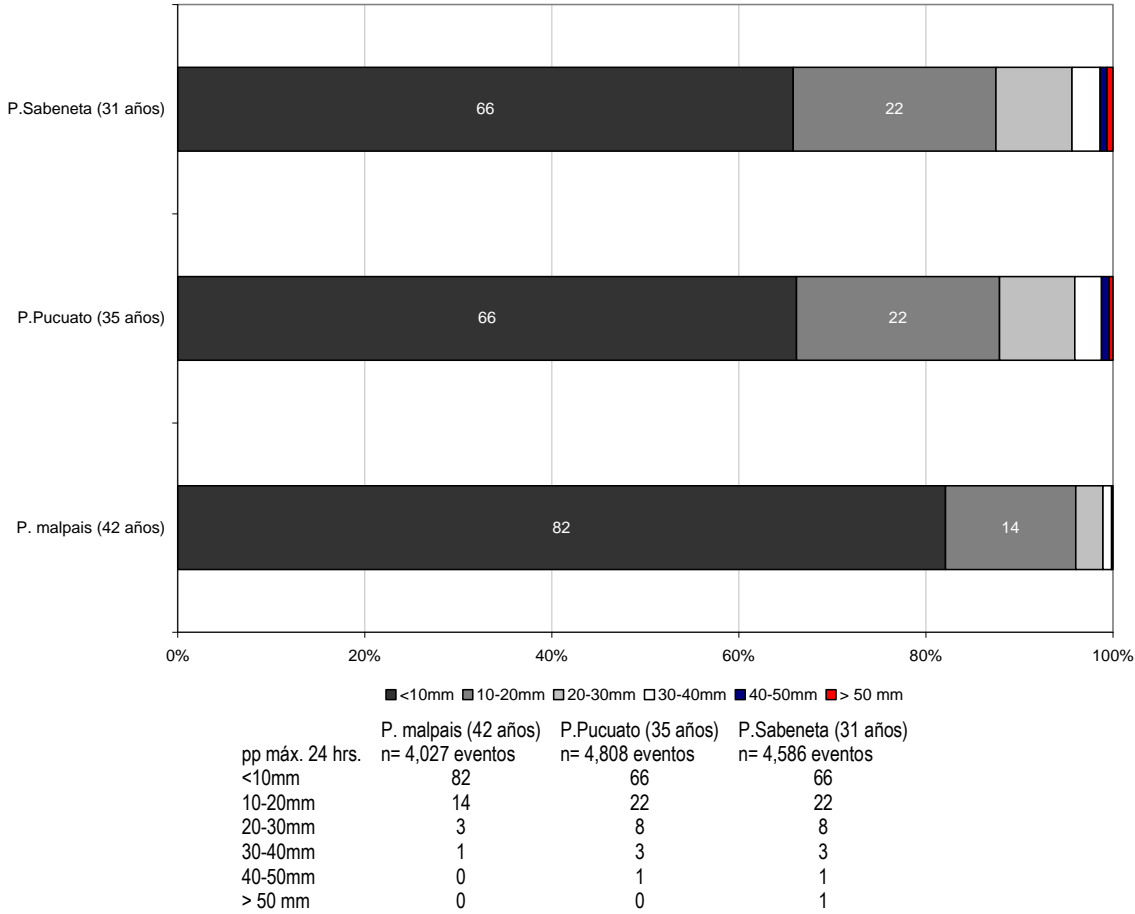


Figura 4.6. Porcentaje de eventos por rango de precipitación acumulada en 24 hrs. Para efectos del diseño del vertedor, se asume la posibilidad que eventos de tal magnitud ocurran en 1 hr.

La información de las 3 estación muestran que el 80 al 90% de la precipitación anual se concentra en días con no más de 20 mm (el promedio más 1 vez la desviación estándar). Por lo anterior y considerando que no se dispone de información en cuanto a la duración de los eventos en que dicha lámina pueda presentarse, se asumió que corresponden a tormentas de 1 hr.



Con este tipo de tormentas se procedió a aplicar el método SCS (1972 citado por Chow et al. 1994) para la estimación de escurrimiento como señalan las ecuaciones en Apéndice 1.

Con base en diversos modelos que calculan el gasto de vertedores rectangulares (ver Apéndice 1), se estimaron diferentes dimensiones del estanque nivelado y de un vertedor que permitiera la medición del escurrimiento resultado de eventos de 5, 10, 15 y 20 mm en una hora, siendo las dimensiones más convenientes en ambos casos: una carga sobre la cresta vertedora (H) de 40 cm, un piscina o estanque de 40 cm de profundidad y una longitud de cresta de 55 cm de longitud como lo muestran la Figura 4.7 y el Cuadro 4.14.



Figura 4.7. Vertedor construido en la salida de la AC experimental 18 (cálculo de dimensiones y construcción por el autor).

Las estimaciones de gastos esperados con este tipo de vertedor conforme se incrementa la cabeza o altura del nivel del estanque, en variaciones de 1 cm se presentan en el cuadro 4.14. Conforme a distintos modelos que explican el comportamiento de este tipo de vertedores, se prevé que tormentas de magnitud de 2 a 5 mm levanten 2 a 4 cm del nivel del estanque, mientras que tormentas de 5 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 mm en 1 hr. eleven el nivel del estanque de 2 a 12, de 13 a 33 y de 33 a 40 cm respectivamente durante el pico de las descargas.

Cuadro 4.14. Flujos (m<sup>3</sup>/s) esperados conforme a diversos modelos (citados por Smajstrala & Harrison 1981), en el vertedor rectangular diseñado. Las líneas entre las celdas separan las estimaciones de H (carga sobre el vertedor) durante eventos de 5, 10, 15 y 20 mm en 1 hr.

H (m)	Francis (1852)	Ftely-Stears (1883)	Rehbock (1912)	King (1912)	SSIA (1924)	SBIM	Smajstrala & Harrison 1981
0.40	0.2188	0.2559	0.2825	0.2873	0.3799	0.2621	0.2187
0.39	0.2115	0.2464	0.2712	0.2760	0.3597	0.2524	0.2114
0.38	0.2043	0.2371	0.2601	0.2648	0.3403	0.2427	0.2042
0.37	0.1971	0.2278	0.2492	0.2538	0.3217	0.2332	0.1970
0.36	0.1900	0.2187	0.2385	0.2430	0.3039	0.2239	0.1899
0.35	0.1829	0.2097	0.2280	0.2324	0.2867	0.2146	0.1828
0.34	0.1758	0.2008	0.2177	0.2219	0.2703	0.2055	0.1757
0.33	0.1688	0.1920	0.2075	0.2117	0.2545	0.1965	0.1687
0.32	0.1619	0.1834	0.1976	0.2016	0.2393	0.1877	0.1618
0.31	0.1550	0.1749	0.1879	0.1918	0.2248	0.1790	0.1549
0.30	0.1481	0.1666	0.1784	0.1821	0.2109	0.1704	0.1481
0.29	0.1414	0.1584	0.1691	0.1726	0.1976	0.1620	0.1413
0.28	0.1347	0.1503	0.1599	0.1634	0.1848	0.1537	0.1346
0.27	0.1280	0.1424	0.1510	0.1543	0.1726	0.1456	0.1280
0.26	0.1215	0.1346	0.1423	0.1454	0.1610	0.1376	0.1214
0.25	0.1150	0.1269	0.1338	0.1368	0.1498	0.1297	0.1149
0.24	0.1086	0.1194	0.1255	0.1283	0.1391	0.1220	0.1085
0.23	0.1023	0.1121	0.1174	0.1201	0.1289	0.1145	0.1022
0.22	0.0961	0.1049	0.1095	0.1120	0.1192	0.1072	0.0960
0.21	0.0900	0.0979	0.1019	0.1042	0.1099	0.1000	0.0899
0.20	0.0839	0.0911	0.0944	0.0966	0.1010	0.0929	0.0839
0.19	0.0780	0.0844	0.0872	0.0893	0.0925	0.0861	0.0780
0.18	0.0722	0.0779	0.0802	0.0821	0.0844	0.0794	0.0722
0.17	0.0665	0.0715	0.0734	0.0752	0.0768	0.0729	0.0665
0.16	0.0610	0.0654	0.0669	0.0685	0.0694	0.0666	0.0610
0.15	0.0556	0.0594	0.0605	0.0621	0.0625	0.0605	0.0556
0.14	0.0503	0.0536	0.0545	0.0559	0.0559	0.0545	0.0503
0.13	0.0452	0.0481	0.0486	0.0499	0.0496	0.0488	0.0452
0.12	0.0402	0.0427	0.0430	0.0442	0.0437	0.0433	0.0402
0.11	0.0354	0.0376	0.0377	0.0388	0.0381	0.0381	0.0354
0.10	0.0308	0.0327	0.0326	0.0336	0.0329	0.0330	0.0308
0.09	0.0264	0.0280	0.0278	0.0287	0.0279	0.0282	0.0264
0.08	0.0222	0.0236	0.0233	0.0240	0.0233	0.0237	0.0222
0.07	0.0183	0.0194	0.0191	0.0197	0.0190	0.0194	0.0183
0.06	0.0145	0.0155	0.0151	0.0156	0.0151	0.0155	0.0145
0.05	0.0111	0.0119	0.0115	0.0119	0.0115	0.0118	0.0111
0.04	0.0080	0.0087	0.0083	0.0086	0.0082	0.0085	0.0080
0.03	0.0052	0.0059	0.0054	0.0056	0.0054	0.0056	0.0052
0.02	0.0028	0.0034	0.0030	0.0031	0.0030	0.0031	0.0028
0.01	0.0010	0.0015	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010

#### 4.4 Resultados y análisis de los datos de los lotes de escurrimiento y aplicación del Modelo de Gash.

El análisis a las mediciones de escurrimientos y láminas interceptadas en las dos condiciones contrastantes de fisonomía-estructura de la vegetación se presenta en el Apéndice 5. Fueron observados mediante lotes de escurrimiento y pluviómetro un total de 108 días consecutivos comprendidos del 10 de julio al 24 de octubre de 2004, de los cuales, 77 días mostraron variaciones en la magnitud de precipitación

y que -para los posteriores análisis- fueron agrupados en rangos de 10 mm, como se señala en el cuadro 4.15.

Cuadro 4.15. Rangos de eventos de precipitación acumulada en 24 hrs. observados mediante pluviómetro.

RANGO (mm)	n (número de eventos)	pp acumulada (mm)	% del total observado	Promedio (mm)	Desviación estándar (mm)	Coefficiente de variación (C.V.)
1 a 10	8	56	4	7	2.5	35.8
10 a 20	29	320	23	11	2.1	19.0
20 a 30	23	471	33	20	1.4	7.0
30 a 40	14	430	31	31	1.8	5.9
40 a 50	3	130	9	43	5.8	13.3

Asimismo, los valores de escurrimiento que resultaron de dichos rangos de precipitación acumulada en 24 hrs. muestran una variación amplia como lo muestra el cuadro 4.16.

Como se observa de los cuadros 4.8 y 4.9, prácticamente el 90% de la precipitación se concentró en eventos que acumularon entre 10 y 40 mm en 24 hrs. y son además los rangos que muestran los menores coeficientes de variación (C.V.). En ese mismo sentido, observando las láminas de escurrimiento que se producen por este tipo de acumulaciones de precipitación son los tratamientos 4 y 1 respectivamente (arbóreo completo y arbóreo con suelo desnudo) los que muestran menos variación, en tanto que en las comunidades arbustivas, herbáceas y el suelo desnudo (tratamientos 5,6 y 7) sus valores de C.V. no fueron, dentro de los rangos mencionados, superiores a los correspondientes observados en las comunidades arbóreas.

El escurrimiento observado en los distintos tratamientos muestran entonces rangos que van de 1 a 88 % del total de lámina de precipitación incidente, de eventos que acumulan entre 10 y 40 mm y en donde las mayores magnitudes observadas de abstracciones (infiltración e interceptación) se concentra en los tratamientos correspondientes a las comunidades con vegetación arbórea.

Cuadro 4.16. Láminas de escurrimiento por rango de precipitación, medida en los distintos tratamientos correspondientes a diferentes estructuras de comunidad vegetal.

RANGO (mm)	1 ARBOREO+ SUELO DESNUDO	2 ARBOREO+ HERBACEO	3 ARBOREO+ HOJARASCA	4 ARBOREO COMPLETO	5 MATORRAL COMPLETO	6 HERBAZAL	7 SUELO DESNUDO	
1 a 10 n=8	0.9	0.1	0.1	0.0	1.4	2.3	3.5	PROM.(mm)
	0.6	0.1	0.1	0.0	1.3	1.7	2.2	DES_EST.
	64	112	123	0	94	75	62	C.V.
	<b>13.4</b>	<b>1.4</b>	<b>1.4</b>	<b>0.0</b>	<b>20.6</b>	<b>32.9</b>	<b>50.0</b>	<b>% ESC</b>
10 a 20 n=29	2.2	0.3	0.2	0.1	2.2	3.1	7.1	PROM.(mm)
	1.1	0.3	0.2	0.2	1.0	1.1	2.9	DES_EST.
	50	106	96	0	44	35	41	C.V.
	<b>19.8</b>	<b>2.8</b>	<b>2.1</b>	<b>1.2</b>	<b>19.8</b>	<b>28.4</b>	<b>64.5</b>	<b>% ESC</b>
20 a 30 n=23	4.8	0.6	0.5	0.3	3.3	4.1	11.9	PROM.(mm)
	2.0	0.3	0.3	0.3	1.7	1.9	4.1	DES_EST.
	42	61	64	0	50	46	34	C.V.
	<b>23.2</b>	<b>2.7</b>	<b>2.2</b>	<b>1.7</b>	<b>16.1</b>	<b>20.1</b>	<b>58.2</b>	<b>% ESC</b>
30 a 40 n=14	6.9	1.2	1.1	1.1	6.0	7.1	27.2	PROM.(mm)
	2.0	0.7	0.6	0.7	1.2	0.9	2.2	DES_EST.
	30	59	59	0	20	13	8	C.V.
	<b>22.4</b>	<b>3.7</b>	<b>3.4</b>	<b>3.5</b>	<b>19.7</b>	<b>23.2</b>	<b>88.6</b>	<b>% ESC</b>
40 a 50 n=3	8.0	2.1	2.1	1.8	8.0	8.0	41.3	PROM.(mm)
	0.0	0.9	0.9	0.3	0.0	0.0	5.8	DES_EST.
	0	43	43	0	0	0	14	C.V.
	<b>18.5</b>	<b>4.9</b>	<b>4.9</b>	<b>4.1</b>	<b>18.5</b>	<b>18.5</b>	<b>95.4</b>	<b>% ESC</b>
<b>R</b>	<b>0.8</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>0.7</b>	<b>0.9</b>	
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.6</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>0.4</b>	<b>0.7</b>	<b>0.6</b>	<b>0.9</b>	

Del mismo modo se observó correlación significativa ( $p < 0.01$ ), entre las magnitudes de los rangos de precipitación y las magnitudes de las láminas de escurrimiento, principalmente para el caso del tratamiento con suelo desnudo, estrato arbóreo y suelo desnudo y matorral completo. Sin embargo dicha correlación no se ajusta de manera significativa a una regresión lineal, como lo deja ver el coeficiente  $R^2$ , salvo en el caso del tratamiento del suelo desnudo sin estrato arbóreo.

En general las medias de los escurrimientos observados por rangos de precipitación se incrementan conforme se incrementa la precipitación. Se observó variaciones amplias entre las medias de escurrimiento dentro y entre los rangos de precipitación así como entre los distintos tratamientos por estructura de las comunidades arbóreas, arbustivas y herbáceas (Figura 4.8).

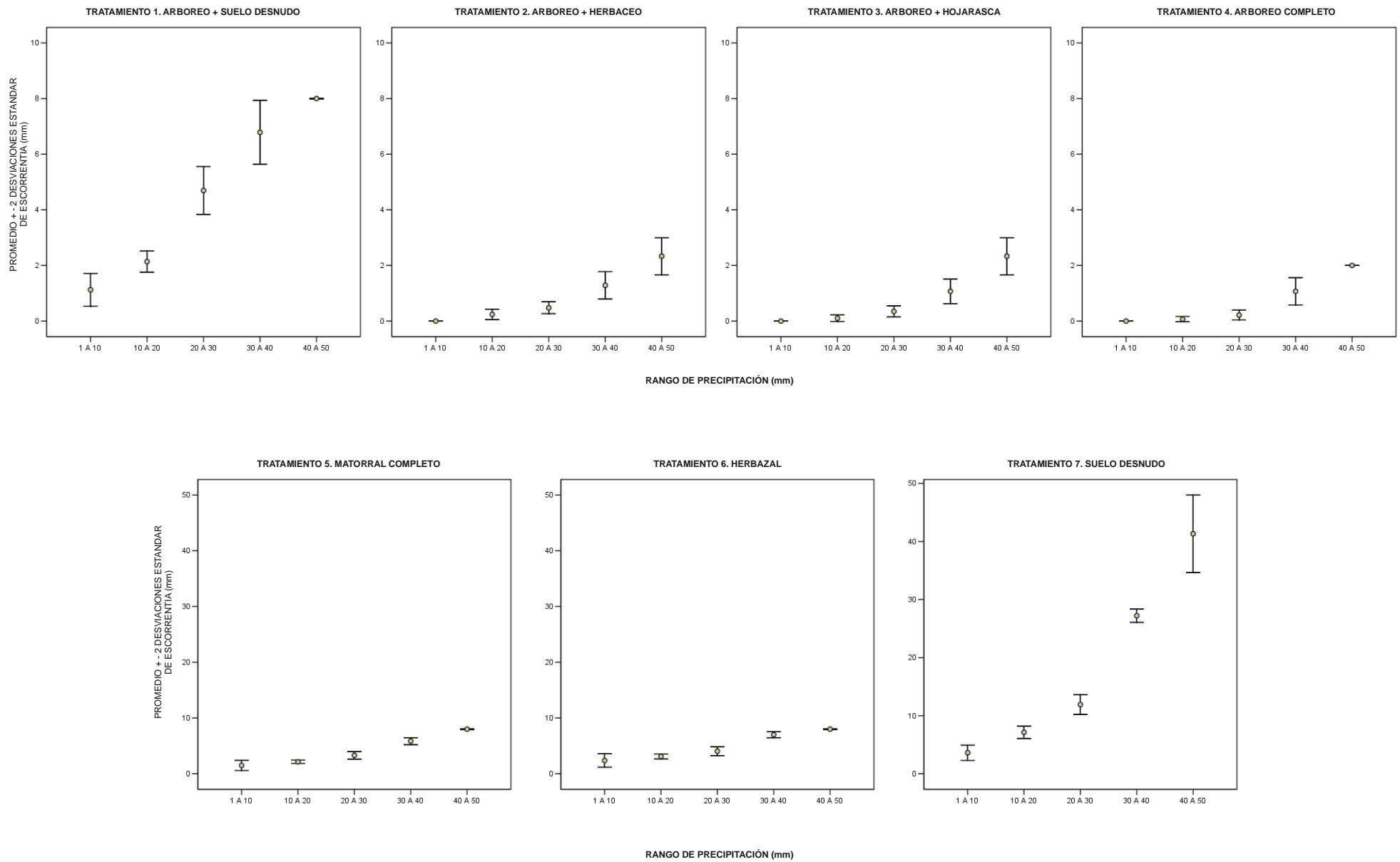


Figura 4.8. Rangos de precipitación (mm) y variación de las medias de lámina de escurrimiento (mm) en los 7 tratamientos observados.

Lo anterior muestra que existen diferencias significativas dentro y entre las muestras correspondientes tanto a los tratamientos como a los rangos de precipitación y que si bien existe una tendencia creciente del escurrimiento conforme se incrementa la magnitud de la precipitación acumulada, esta es significativamente menor en condiciones de una estructura de vegetación dominada por estrato arbóreo, siempre y cuando este se encuentre asociado con un estrato en el sotobosque, es decir, que presente desarrollado un estrato herbáceo o al menos la presencia de hojarasca. La Figura 4.9 resume lo anterior y puede destacarse de la misma que el escurrimiento observado en condiciones de matorral completo es equivalente en porcentaje de escurrimiento con la condición arbórea sin estratos arbustivo, herbáceo ni hojarasca (arbóreo + suelo desnudo) ante el rango de eventos que acumularon entre 10 y 20 mm de precipitación, mientras que ante eventos de rangos de 20 a 30 y 30 a 40 mm el escurrimiento en este último tipo de tratamiento resultó mostrar incluso mayor magnitud que el tratamiento correspondiente a matorral en condición completa.

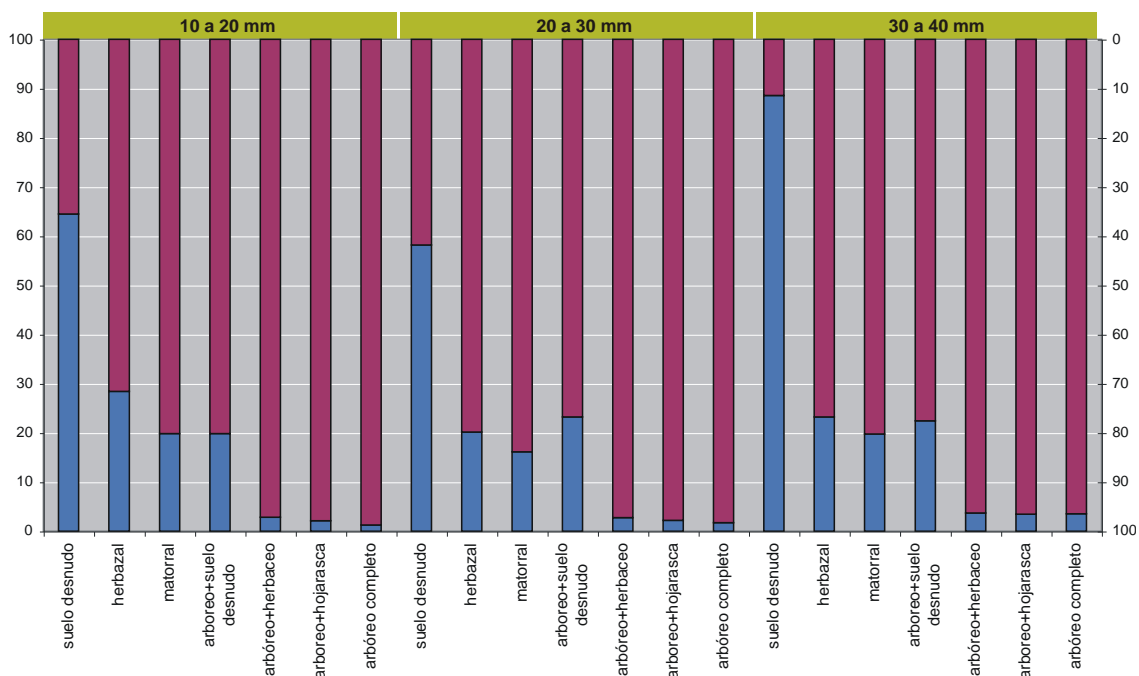


Figura 4.9. Proporciones de escurrimiento (azul) y abstracciones (violeta) observadas en los siete tratamientos, conforme al total de precipitación acumulada por rangos.

Pero la gran proporción observada de abstracciones en la mayoría de los tratamientos, incluyendo principalmente aquella correspondiente al suelo desnudo ante precipitaciones acumuladas de 40 mm, es atribuible conforme lo señala la literatura, no solo a pérdidas por intercepción sino también a pérdidas por infiltración. Si bien sobre este último particular no se llevaron a cabo pruebas ni registros, si en cambio se tienen las observaciones de las pérdidas por intercepción en las comunidades con estrato arbóreo.

El modelo genérico de balance hídrico que considera a las pérdidas por intercepción fue enunciado en la ecuación 2 y las especificaciones del modelo de Gash relativas a dicho fenómeno en las ecuaciones 3 a 6. El apéndice 6 del presente trabajo expone en extenso los resultados en lámina de los parámetros TF (precipitación directa), SF (escurrimiento fustal o flujo caulinar) e I (intercepción) y la proporción estimada que dicha lámina de intercepción representa de la precipitación total incidente (PG) en los lotes de experimentales. Adicionalmente, se registraron en las áreas de aforo de las AC experimentales mediante data logger pluviométricos un total de 91 tormentas de las que se tiene su comportamiento detallado como lo expone el apéndice 7.

Sin embargo, se consideraron los rangos de precipitación hasta ahora señalados presentan condiciones para la saturación de dosel y de los troncos y ramas de los cuatro tratamientos en comunidades con estrato arbóreo conforme a las ecuaciones mencionadas. Un análisis de varianza muestra la existencia de diferencias significativas entre las medias muestrales de los valores de escurrimiento fustal (SF) y de precipitación directa (TF) (Cuadro 4.17). Aunque en la estimación de dichas láminas (Apéndice 6) se presentaron deficiencias en la manipulación de los volúmenes medidos cada 24 hrs., lo que condujo a que el resto de los análisis se llevaran a cabo solo con 66 tormentas, muy probablemente es una de las razones de las diferencias observadas, pero sin duda, son las características de los elementos arbóreos que constituyen cada lote lo que incorpora parte fundamental de la variación.

En el lote 1 se presentó un elemento maduro pero de relativamente medianas dimensiones de la especie *Abies religiosa* (altura de 12 m, dap. de 27 cm y copa con radio de 2.3 m). El lote 2 se dispuso con un individuo de la especie *Quercus laurina* de medianas dimensiones (altura de 10 m, dap. de 43 cm y copa con radio de 7.58 m). El lote 3 presentaba un individuo de la especie *Pinus pseudostrobus* de grandes dimensiones (altura de 27 m, dap. de 213 cm y copa con radio de 8 m) al que le fue removido el estrato arbustivo permaneciendo un estrato herbáceo similar al que presenta la comunidad dominada por esta especie en la región y que es empleada para fines de resinación. Finalmente el lote 4 contenía parte de un individuo de *Pinus pseudostrobus* de medianas dimensiones (altura de 11 m, dap. de 23 cm y copa con radio de 4.1 m), un individuo de la especie *Quercus laurina* de relativamente pequeñas dimensiones (altura de 7 m, dap. de 15 cm y copa con radio de 3 m) pero un estrato arbustivo abundante dominado por tres individuos de la especies *Ternstroemia pringlei* (altura promedio de 3.5 m, dap promedio de 5 cm y copas de radio promedio de 1.8 m).

Cuadro 4.17. Resultados del análisis de varianza del escurrimiento fustal (SF) por rango de precipitación acumulada en 24 hrs (ppt) y estructura de comunidad vegetal arbórea (tratamientos 1 a 4).

		Suma de	Grados de	Cuadrados de	F	Sig.
		cuadrados	libertad	la media		
1 ARBOREO + SUELO DESNUDO Presencia de <i>Abies religiosa</i>	Entre los rangos de ppt	1.46	4	0.37	32.930	0.000
	Dentro de los rangos de ppt	0.78	70	0.01		
	Total	2.24	74			
2 ARBOREO + HERBACEO Presencia de <i>Quercus laurina</i>	Entre los rangos de ppt	0.07	4	0.02	21.056	0.000
	Dentro de los rangos de ppt	0.06	70	0.00		
	Total	0.13	74			
3 ARBOREO + HOJARASCA Presencia de <i>Pinus pseudostrobus</i>	Entre los rangos de ppt	0.07	4	0.02	29.105	0.000
	Dentro de los rangos de ppt	0.04	70	0.00		
	Total	0.12	74			
4 ARBOREO COMPLETO Presencia de <i>P. pseudostrobus</i> ; <i>Q. laurina</i> , <i>Ternstroemia pringlei</i>	Entre los rangos de ppt	0.07	4	0.02	30.821	0.000
	Dentro de los rangos de ppt	0.04	70	0.00		
	Total	0.11	74			

La desagregación de las observaciones con respecto a las magnitudes de lámina de interceptación supone que las diferencias en la estructura de la comunidad vegetal representa una acumulación diferencial de láminas de agua en su dosel, así como en sus troncos y ramas, como se asentó en las ecuación 4. De manera



que para obtener estos parámetros individualizados se procedió a obtener primero conforme a la ecuación 6 la ordenada y la pendiente de la regresión lineal entre escurrimiento fustal (SF) y precipitación incidente (PG) para obtener los valores correspondientes a la capacidad de almacenamiento de agua en troncos (st) y la proporción de la precipitación incidente que alcanza los troncos (pt). De ese modo se obtiene la lámina acumulada en troncos y ramas (P't). Los modelos de regresión lineal obtenidos para cada uno de los tratamientos en condición arbórea se muestran en la figura 4.10.

Posteriormente, se considera una forma simplificada de aplicar el modelo de Gash (1979). De acuerdo con diversos autores (Schellekens 2000, Remmel 2001 y Link 2002), las pérdidas por intercepción en un dosel que es saturado por la lluvia en 'n' eventos individuales se puede representar como lo indica la ecuación (13). En el caso de 'm' eventos que no son capaces de saturar la capacidad de almacenamiento del dosel, como se expresa en la ecuación (14). En el caso de 'q' tormentas que saturan la capacidad de almacenamiento en troncos como lo expresa la ecuación (15) y en el caso de tormentas que no saturan la capacidad de almacenamiento de los troncos como en la ecuación (16):

$$I = n(1-TF-pt) \cdot \sum P'G - nS \quad \dots \quad (13)$$

$$I = m(1-TF-pt) \cdot \sum P'G \quad \dots \quad (14)$$

$$I = q \cdot st \quad \dots \quad (15)$$

$$I = pt \sum P'G \quad \dots \quad (16)$$

Con base en lo anterior se asume que las tormentas que generan SF es porque alcanza P'G y entonces  $I = P'G + P't$ . La I observada en 75 eventos en el presente estudio que generaron SF permitió despejar valores de P'G.

Luego con tales estimaciones y suponiendo una evaporación media de 2.87 mm diarios que es el dato promedio, resultado de las observaciones en las 2 estaciones meteorológicas mas próximas al área de estudio, se despeja de la

ecuación 5 el parámetro S y para cada uno de los lotes experimentales. Los resultados se presentan en el cuadro 4.18 para cada condición.

Finalmente se estimaron por interpolación a partir de los valores medidos de escurrimiento, el porcentaje de intercepción para herbazal y matorral, y por diferencia. De este modo el balance global queda completo en los eventos observados los valores medidos de precipitación (PG), los valores medidos en todas las condiciones del escurrimiento (Q) y los valores observados e interpolados (matorral y herbazal) de la intercepción. Despreciando la eventual evaporación directa de la superficie del suelo en todas las condiciones, el balance global de los parámetros medidos y estimados permite obtener por diferencia con la precipitación (PG) una estimación de la proporción de lámina que se infiltra o al menos permanece retenida en el suelo (Cuadro 4.18).

Cuadro 4.18 Balance proporcional de la precipitación incidente por lote experimental y valor estimado de S.

Condición y fisonomía vegetal	tratamiento	%ESCURRIMIENTO	% INTERCEPCION	% INFILTRACION	S (mm)
Arbóreo ( <i>Abies</i> )+suelo desnudo	1	21.8	36.8	41.4	7.4
Arbóreo ( <i>Quercus</i> )+herbáceo	2	3.1	37.7	59.2	10.4
Arboreo ( <i>Pinus</i> )+hojarasca	3	2.6	31.4	66.0	8.7
Arbóreo ( <i>Pinus-Quercus</i> ) completo	4	2.1	47.1	50.8	12.6
Matorral completo	5	18.5	31.4	50.0	6.7
Herbazal	6	23.9	28.4	47.7	5.3
Suelo desnudo	7	70.4	0.0	29.6	0.0

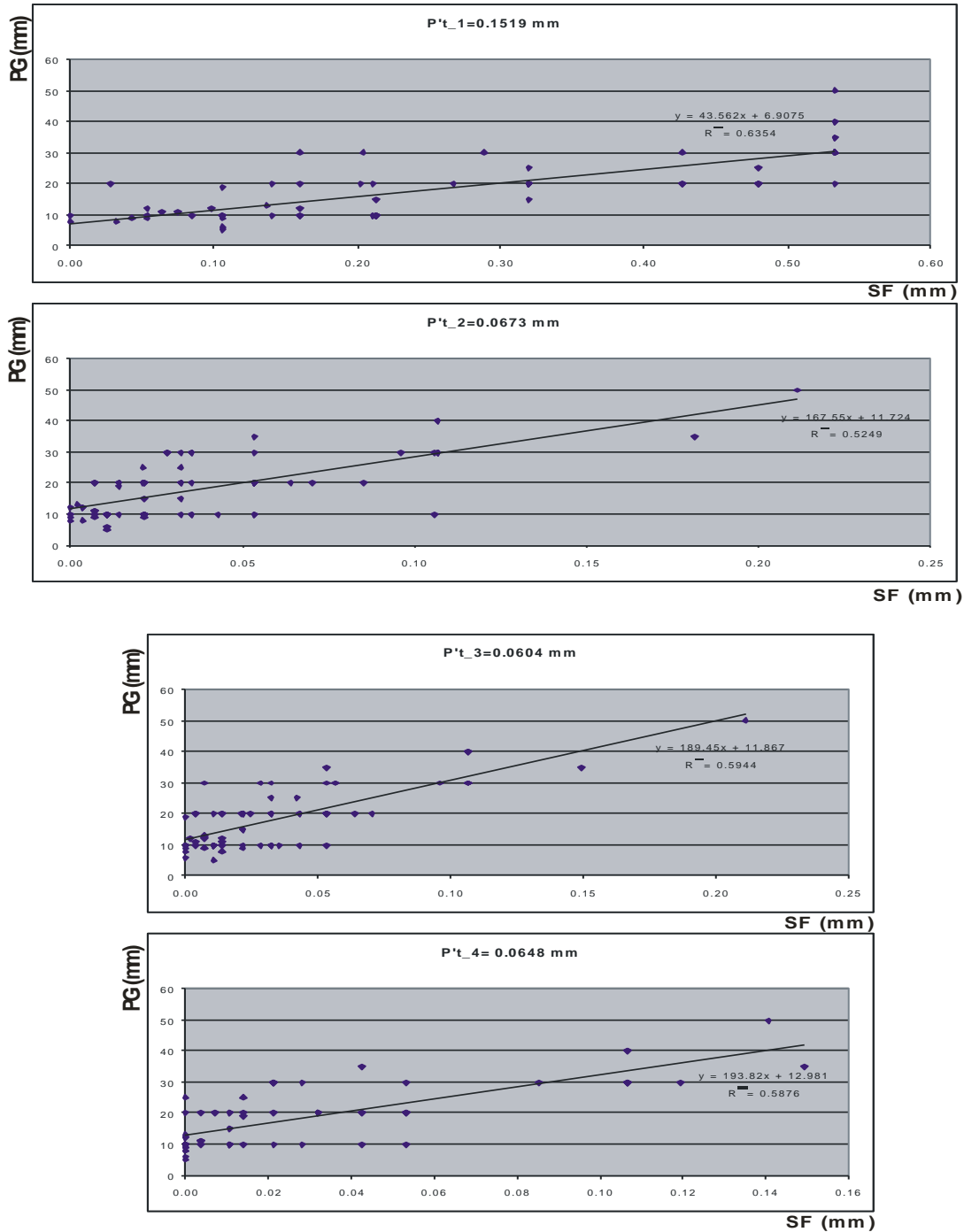


Figura 4.10. Modelos de regresión lineal de SF vs. PG (mm) y obtención del parámetro P't para los tratamientos en distintas composiciones de comunidad vegetal P't\_1: *Abies religiosa*; P't\_2: *Quercus laurina*; P't\_3: *Pinus pseudostrobus* y P't\_4: *Pinus pseudostrobus*, *Quercus laurina* y *Ternstroemia pringlei*.

#### **4.5 Fase IV: Calibración del Modelo Hidrológico. Hietogramas e hidrogramas observados y simulados en los puntos de deyección de las AC 18 y 30.**

Los 91 eventos monitoreados mediante dispositivos automatizados de almacenamiento (logger) en los puntos de drenaje de las AC experimentales produjeron enormes volúmenes de datos de precipitación y niveles de los estanques nivelados. Estos datos fueron analizados para producir los hidrogramas de precipitación y gasto en el vertedor conforme al modelo de Ftely Stearn (1883) (Citado por Smajstrala & Harrison 1983) el cual fue el que mostró los valores de gasto mas apropiados para las estimaciones esperadas. En relación a los datos de las tormentas, estos son resumidos en el apéndice 7 en términos de su fecha y hora de ocurrencia, intensidad promedio (mm/h), magnitud (mm), duración (h), tiempo antecedente sin precipitación previa (min), tiempo en alcanzar la intensidad máxima (min) e intensidad máxima en 5 minutos (mm).

Del total de tormentas observadas, el 91 % (83) corresponden a eventos que no alcanzan una intensidad promedio de 10 mm/hr; mientras que el 7 y 2 % respectivamente (7 y 2 eventos) corresponden a los que alcanzan el intervalo de 10 a 20 y 20 a 30 mm de intensidad en 1 hr. Un total de 42 tormentas no pudieron ser evaluadas en su tiempo de recesión en virtud de que antes de que terminara de descargar la lámina captada se presentó una segunda tormenta.

Como fue señalado en la metodología, el primer paso en la calibración del modelo hidrológico consistió en la identificación de los parámetros inherentes al comportamiento de la precipitación y el flujo de las descargas producidas para identificar posibles tendencias o correlaciones entre los aspectos evaluados. Un total de 11 parámetros fueron obtenidos y adecuados a unidades equivalentes (metros y horas) para su posterior análisis, estos son: 1.-Intensidad promedio (m/hr); 2.-Magnitud (m); 3.-Duración (hr); 4.-tiempo antecedente sin precipitación (hr); 5.-tiempo en alcanzar la precipitación su intensidad maxima (hr); 6.-tiempo de diferencia entre la intensidad máxima y el tiempo al pico de la descarga (hrr); 7.-

tiempo al pico de la descarga (Tp) observado (h): 8.-Tp esperado (modelo SCS) (hr); 9.- gasto al pico de la descarga (qp) observado (m<sup>3</sup>/hr) y 10.-qp esperado (modelo SCS) (m<sup>3</sup>/hr) y tiempo de recesión del escurrimiento (hr) (ver apéndice 7 y 8).

El Análisis de Componentes Principales (PCA) llevado a cabo con la información de los hidrogramas de precipitación y los hidrogramas de escurrimiento tanto para el AC 18 como para el AC 30 se realizó exceptuando, de los 11 parámetros evaluados, a la intensidad (m/hr), ya que las unidades resultantes son muy pequeñas pero sobre todo debido a que en si mismo es un parámetro que relaciona a la magnitud y la duración de las tormentas. También se exceptuó el tiempo de recesión ya que no se pudo observar para todas las tormentas.

Los resultados muestran primero que tres componentes explican casi el 80% de la variación de los datos de las tormentas y los escurrimientos en ambas AC experimentales (Cuadro 4.19).

Cuadro 4.19. Totales de la varianza explicada en los datos de precipitación y escurrimiento en el PCA.

Componente	Eigenvalores iniciales AC18			Eigenvalores iniciales AC30		
	Total	% of Varianza	%Acumulada	Total	% of Varianza	%Acumulada
1	3.29	36.52	36.52	3.75	41.69	41.69
2	2.70	30.04	66.56	2.17	24.08	65.77
3	1.07	11.85	78.41	1.16	12.92	78.69
4	0.95	10.60	89.01	0.87	9.66	88.35
5	0.70	7.73	96.74	0.59	6.60	94.95
6	0.23	2.58	99.32	0.22	2.46	97.41
7	0.05	0.60	99.92	0.14	1.59	99.00
8	0.01	0.08	100.00	0.09	1.00	100.00
9	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00

En segundo lugar, la matriz rotada del PCA (Cuadro 4.20) muestra que los posibles factores a extraer para posteriores análisis son -para ambas cuencas- la duración y el tiempo al pico de las descargas (conforme al modelo SCS).

La relación entre la duración y la magnitud de las tormentas (componentes 1 y 2 en AC 18) es previsible, aunque conciernen exclusivamente al comportamiento de

los eventos y no de su relación con las descargas, por lo que resulta mas interesante relacionar los de las descarga pico observadas con la duración de la tormenta o con el tiempo al pico de la descarga. El componente 3 indiscutible de los datos del AC18 corresponde al tiempo antecedente sin precipitación en tanto que en el AC 30. Dicho factor aparece después de la diferencia entre el tiempo pico de la tormenta y el tiempo pico de la descarga.

Cuadro 4.20. Matriz rotada por el método Varimax con Normalización Kaiser del ACP para los datos de ambas AC.

VARIABLES	Componente en AC18			Componente en AC30		
	1	2	3	1	2	3
Magnitud (m)	0.2184	<b>0.9363</b>	-0.0563	0.364	<b>0.851</b>	-0.199
Duración (hr)	<b>0.9321</b>	0.0911	0.0587	<b>0.954</b>	-0.028	0.032
t antecedente sin pp (hr)	0.0440	0.1187	<b>0.8152</b>	-0.091	0.029	<b>0.636</b>
t en alcanzar pp max (hr)	0.6315	0.1399	-0.5558	0.927	-0.036	0.129
t pp_max-Tp (hr)	0.5198	-0.4238	0.1688	0.290	-0.042	<b>0.783</b>
Tp observado (hr)	0.8442	-0.1514	-0.3459	0.840	0.139	0.092
Tp esperado (modelo SCS) (hr)	<b>0.9322</b>	0.0924	0.0587	<b>0.954</b>	-0.029	0.032
qp_obs(m3/hr)	-0.0119	<b>0.8829</b>	0.0269	-0.146	<b>0.913</b>	0.136
qp esperada (modelo SCS) (m3/hr)	-0.1307	<b>0.8825</b>	0.2244	-0.180	0.588	-0.622

Los resultados del componente 1 y 2 en los datos de ambas AC también son previsibles dado que el modelo SCS vincula precisamente entre otros parámetros el tiempo pico de la descarga con la duración de la tormenta y la cantidad de descarga pico. Las ecuaciones de ajuste de regresión lineal entre duración de la tormenta y Tp en ambos conjuntos de datos se presentan en la figura 4.11. De hecho, el ajuste es exacto para el modelo SCS en los datos de ambas AC, en tanto que el coeficiente  $R^2$  de los valores observados no presenta un adecuado ajuste en ninguno de los casos.

De lo anterior se desprende la necesidad de ajustar o calibrar otro tipo de modelo hidrológico con los resultados de las mediciones observadas, en este caso uno que tome en cuenta las variaciones espaciales de aspectos que el modelo del SCS considera de manera empírica (como tipo de suelo y cobertura vegetal) pero que dado su carácter de modelo espacialmente no distribuido impide la incorporación de las variables de cobertura (y capacidad de almacenamiento de

agua en el dosel de las mismas) presentes en las AC de manera diferencial, que es la hipótesis a probar en el presente estudio.

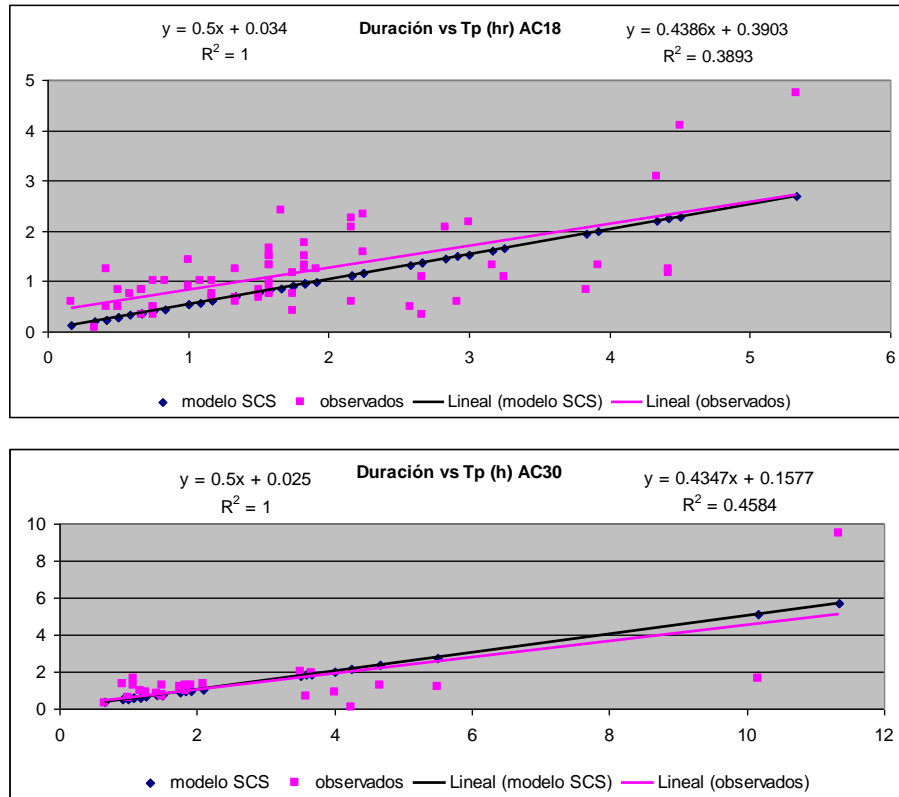


Figura 4.11. Modelos de regresión lineal entre duración de las tormentas y tiempo al pico de la descarga observados y modelados de acuerdo con la propuesta de SCS.

En ese sentido el modelo espacialmente distribuido HEC-HMS incorpora la posibilidad de espacializar valores SCS para definir variaciones localizadas que tienen repercusión principalmente a nivel de abstracciones totales, mediante sus módulo HEC-GEOHMS. Inicialmente, se corrieron ejercicios de calibración simple mediante series de tiempo con tormentas seleccionadas y luego se intentó con las extensiones del modelo que distribuyen espacialmente las simulaciones.

Se aplicó un análisis de conglomeración por unión promedio (UPGAM) considerando las características de magnitud, duración, tiempo antecedente sin precipitación, tiempo de la tormenta en alcanzar su intensidad máxima, diferencia

entre el tiempo a la intensidad máxima de la tormenta y tiempo al pico de la descarga y tiempo al pico de la descarga, identificándose 6 pares de eventos con porcentaje de similitud mayor a 92% las cuales tuvieron que seleccionarse del total de 91 tormentas muestreadas en virtud de que solo se dispuso de 1 data logger de nivel que periódicamente fue removido del vertedor en el AC 18 al vertedor de la AC 30. El cuadro 4.21 presenta dichas características que sirvieron de base para seleccionar los eventos cuyas series de tiempo (precipitación-escorrimento) fueron empleados en la calibración y comparación de hidrogramas en ambas AC (ver apéndice 9).

Cuadro 4.21. Características de los eventos seleccionados y cuyas series de tiempo fueron usadas en la calibración del modelo HEC-HMS.

AC	Fecha	hr. aprox.	Evento ID	Magnitud (mm)	Duración (h)	t antecedente sin pp (h)	t en alcanzar pp max (h)	t pp_max-tp (h)	Tp_observado (hr)	% Similitud
18	Jul.27	16:00	19	10.7	3.25	10.92	0.42	0.50	1.08	92.45
30	Ags 19	13:55	42	7.6	4.00	9.75	0.67	0.42	0.92	
18	Sep-05	23:34	54	5.8	1.83	2.67	0.17	1.08	1.33	93.17
30	Oct-06	21:32	84	4.8	2.08	2.92	0.33	0.75	1.33	
18	Sep-12	22:39	59	1.0	1.50	49.83	0.08	0.67	0.83	97.17
30	Oct-11	18:17	89	3.0	1.00	51.50	0.25	0.25	0.58	
18	Sep-16	15:29	62	2.0	1.83	13.67	0.58	0.67	1.25	97.14
30	Oct-07	12:37	85	3.3	1.83	13.00	0.25	0.67	1.25	
18	Sep-19	16:14	65	11.9	0.75	19.42	0.42	0.50	1.00	98.00
30	Oct-13	14:13	91	12.7	1.25	19.17	0.48	0.50	0.92	

Los resultados de la calibración del modelo HEC-HMS para los pares de eventos similares se presentan gráficamente en las figuras 4.12 para los casos en que la magnitud de los eventos son inferiores a 10 mm y en la figura 4.13 en los casos en que la magnitud se aproxima o rebasa ligeramente los 10 mm.



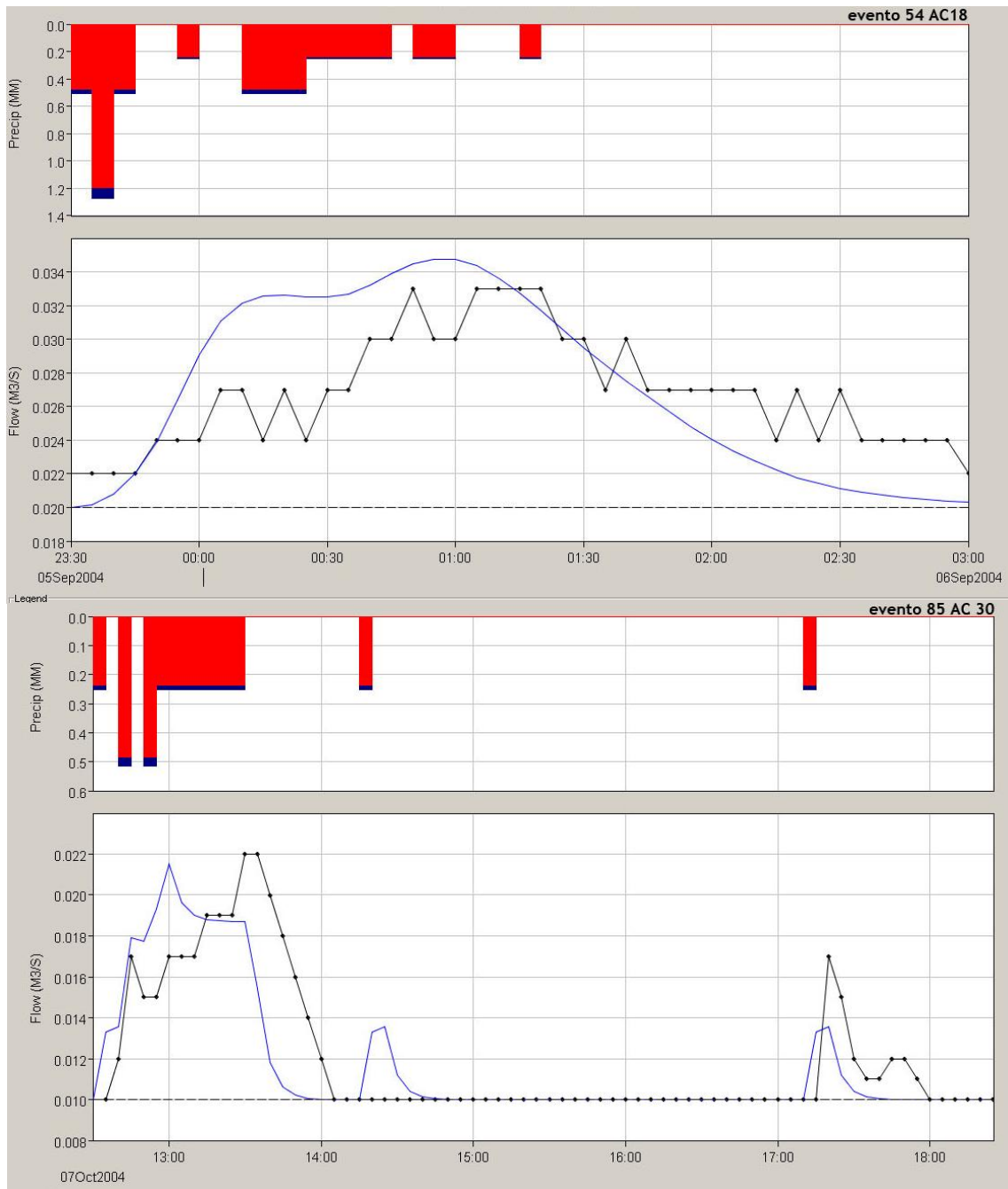


Figura 4.12. Hidrogramas de precipitación (hietogramas) y escurrimiento de 2 eventos de magnitud inferior a 10 mm en ambas AC en el proceso de calibración de HEC.

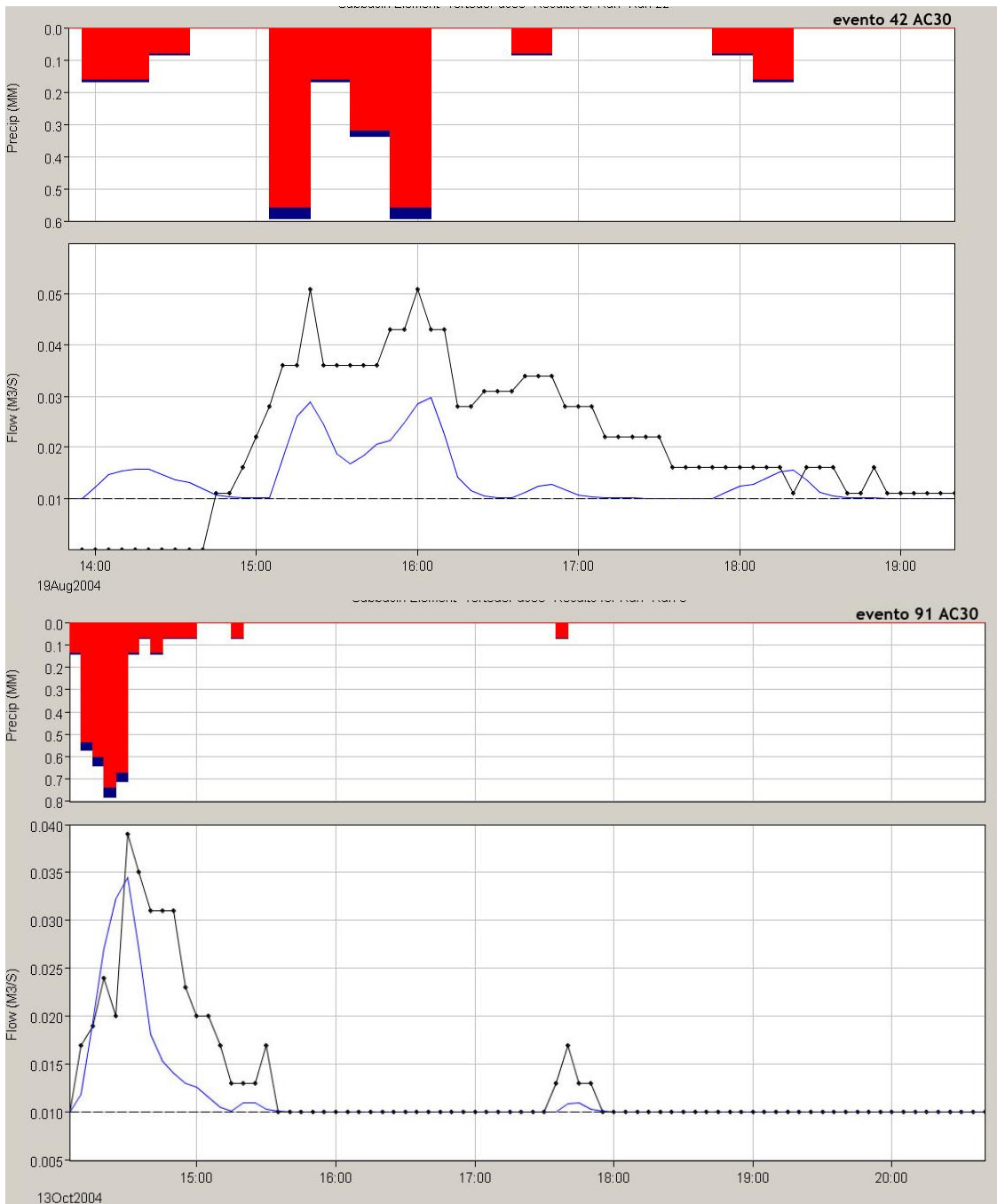


Figura 4.13. Hietogramas e hidrogramas de 2 eventos que se aproximan o rebasan ligeramente los 10 mm de precipitación en ambas AC.

Las barras en color rojo en sentido vertical descendente de la parte superior de las graficas indican la precipitación acumulada (mm) en 5 minutos registrada en el dispositivo automatizado de almacenamiento (rain logger) y constituyen los

denominados hietogramas. El color rojo en las barras representa la estimación del modelo del volumen de las abstracciones (mm) y el color azul el exceso de precipitación (Pe también en mm). En la parte inferior de los gráficos se observa en línea negra punteada, los valores observados de escurrimiento en los vertedores de las respectivas AC. Se observa como se parte de un flujo base de aproximadamente  $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$  en el AC 18 y de un valor ajustado a  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$  en los casos de la AC 30. En todos los casos se utilizó el modelo de Ftely-Stears (1883) (citado por Smajstrala & Harrison 1983) para la conversión de los registros de altura de la cabeza del vertedor adquiridos cada 5 minutos a valores de flujo. Adicionalmente en líneas de color azul continuo, se muestra el valor calculado con el modelo HEC-HMS. Debe destacarse que con este nivel de calibración, se obtuvieron –como en el caso del modelo de hidrograma sintético adimensional– valores de  $T_p$  simulados y observados bastante aproximados. No así –nuevamente– en los casos de gasto o flujos máximos al pico de la tormenta. Lo anterior obedece principalmente a que las características del modelo de cuenca que demanda HEC no consideran en esta primera fase de calibración la distribución espacial de los valores de curva numérica (CN) diferenciados.

En todos los casos los ejercicios de calibración tendieron al ajuste de dicho valor: es decir, el de número de curva, el cual se fue ajustando a condiciones normales de humedad antecedente total en 5 días entre 1.4 y 2.1 pulgadas y la incorporación a este nivel de las características de capacidad de almacenamiento de agua en el dosel, lo que permitió estimar la “abstracción inicial” con valores sin ponderar espacialmente de entre 3 y 11 mm, suponiendo para ello que el total de las abstracciones corresponden a la ya citada capacidad de almacenamiento del dosel.

Asimismo, el programa HEC-HMS demanda un insumo referente al porcentaje de la cuenca o AC con suelo desnudo, este fue estimado en un 6% considerando el área urbana del AC 18 , y de 0% en el caso de la AC 30.

Un rasgo del reducido grupo de tormentas seleccionadas para su comparación es que lamentablemente muestran una duración extendida con intervalos sin precipitación, lo que genera varios picos de descarga en un mismo evento analizado. El modelo HEC considera una estimación de la ubicación en el tiempo del “centro de la masa” de la descarga que para este tipo de ejercicios resulta de mayor significado que  $T_p$  como tal.

Los resultados de la calibración entre los valores observados y los simulados por el modelo HEC permitieron mediante el módulo de prueba de optimización que se reconsideraran los valores del número de curva y magnitud inicial de las abstracciones.

#### **4.6. Fase V: Generación de Escenarios Ambientales.**

Con la identificación y calibración de los parámetros mas sensibles del modelo HEC-HMS para su aplicación conforme a los planteamientos del SCS al conjunto del área de estudio se procedió a estructuración del modelo geométrico de subunidades del área de estudio, es decir el modelo de cuenca del conjunto de AC mediante la extensión GEO-HMS en el sistema ArcView.

Este proceso consta fundamentalmente de la delineación y caracterización física e hidrológica de subunidades a partir del MDT mediante la secuencia de (1) “llenado de retícula” que representa físicamente la corrección hidrológica de las elevaciones para ejecutar las simulaciones de escurrimiento asumiendo en este caso la ausencia de embalses y sumideros. Se continúa con (2) la definición de la dirección de escurrimientos, (3) la definición de concentración espacial de los mismos, (4) el establecimiento de una dimensión de retícula que permitiera obtener dimensiones de las subunidades equivalentes a las AC descritas en la fase de caracterización física y que resultó ser de  $0.17 \text{ km}^2$  produciendo similar número de subunidades. Estos productos parciales son entonces vectorizados y asociados a una base de datos que la extensión GEO-HMS permite exportar al módulo propiamente de modelamiento (HMS) y constituye con sus distintos

componentes (subcuencas, canales, uniones y salida) el modelo de cuenca con la concatenación y conexión de subunidades requerido para las simulaciones a nivel de toda el área de estudio (Figura 4.14).

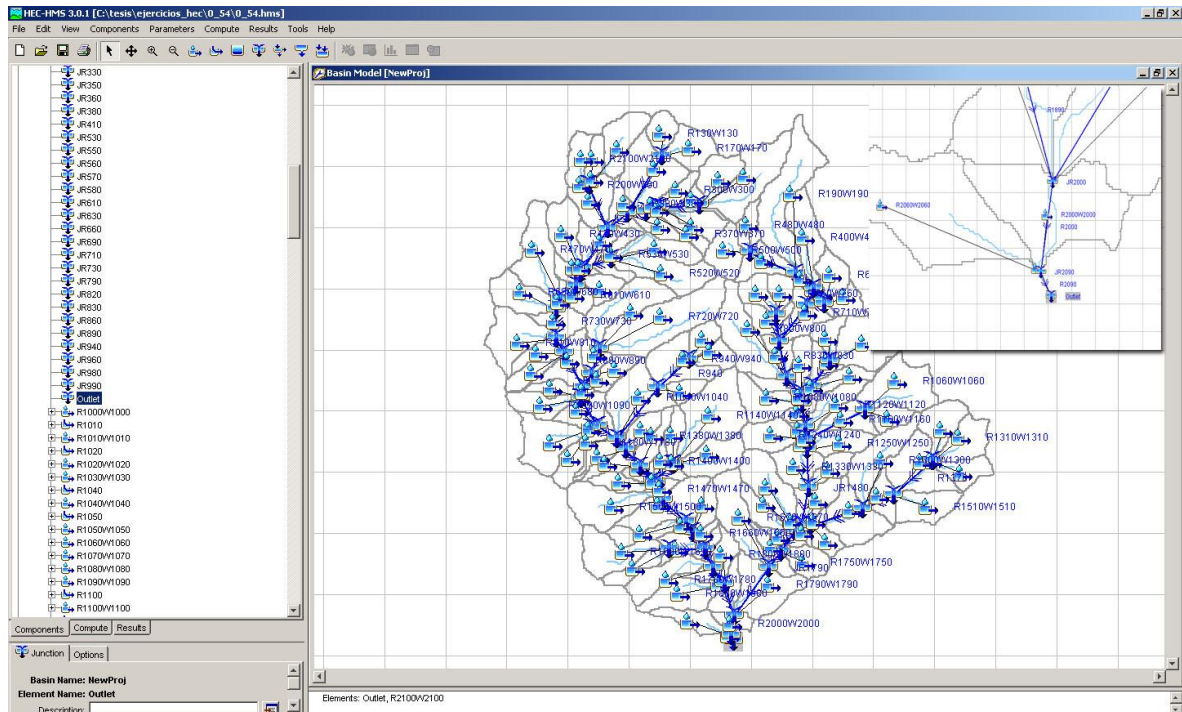


Figura 4.14. Esquematización del modelo geométrico del área de estudio, importado al módulo HMS. Las líneas rectas indican la dirección de los flujos de cada subunidad. La base de datos contiene la información hidrológica de las subunidades para los ejercicios de simulación.

Toda vez que los parámetros mas sensibles de calibración del modelo requieren para su incorporación en los ejercicios de simulación distribuida, de un modelo rasterizado de los valores de curva numérica, capacidad de almacenamiento de agua en el dosel (abstracciones iniciales) y proporción impermeable de la subcuenca (superficies urbanas, asfaltadas, etc.) y en virtud de que la subrutina de rasterización aplica un sistema de proyección geográfica incompatible con la retícula UTM de la región 14N seguida en el presente trabajo, se procedió a la identificación de tales atributos mediante rutinas no automatizadas.

Se estimaron mediante los mapas de Unidades de Respuesta Hidrológica Convencionales y Vegetación y Uso del Suelo del año 2003 los valores de CN para condiciones antecedentes de humedad tipo II de acuerdo a los valores reportados por el SCS (Cuadro 4.22), en tanto que fueron retomados los valores de capacidad de almacenamiento de agua en el dosel y las estimaciones del presente estudio realizadas a nivel de lotes de escurrimiento experimentales (Cuadro 4.18).

Cuadro 4.22. Números de curva para los tipos vegetación y usos de suelo del área de estudio (Adaptado de Chow et al. 1994).

Vegetación y uso del suelo (conforme a mapa correspondiente del año 2003)	Numero de curva (conforme al mapa de URHC) todos dentro del grupo hidrológico de suelo tipo B	Capacidad estimada de almacenamiento de agua en el dosel, incorporado a HEC como lámina inicial de abstracciones
Bosque Natural Templado Perenne Linearifolio	73	11
Bosque Natural Templado Perenne Latifolio	77	8
Bosque Natural Templado Subperenne Latifolio	70	12
Bosque Natural Tropical Caduco Latifolio	77	7
Bosque Antrópico Templado Perenne Aciculi-Latifolio	77	9
Matorral Antrópico Euriclimático Heterófilo	80	6
Herbazal Antrópico Euriclimático Perenne Angustifolio	83	4
Uso Agrícola	87	2
Uso Habitacional	90	0

En ambos casos dichos valores fueron ponderados con base en el área por la abundancia proporcional de la vegetación o uso del suelo en cada una de las subunidades identificadas e ingresadas manualmente al modelo geométrico importado al módulo HMS. Asimismo, fue necesario recalcular los  $t_p$  de las unidades generadas por GEO-HMS, el cual conforme al modelo del SCS corresponde a  $0.6t_c$ . Los nombres asignados de las subunidades y los parámetros de alimentación del modelo antes señalados se presentan en el Apéndice 9.

El **escenario base** corresponde a las condiciones de vegetación y uso de suelo expresadas en número de curva y magnitud de abstracciones iniciales, considerando que los eventos simulados preceden a un secado completo del dosel y dejan a éste en condiciones de usar la totalidad de su capacidad de almacenamiento. El tipo de tormentas simuladas para el área de estudio supone asimismo una distribución homogénea en magnitud y duración (intensidad) en el

total de la superficie y corresponden a 6 de los eventos evaluados que sirvieron en la calibración del modelo y cuyo flujo total atribuible a dichas tormentas produjeron los volúmenes señalados en el cuadro 4.23. Su comportamiento gráfico en hietogramas e hidrogramas, se presentan más adelante en las figuras de los escenarios ambientales y sus valores en el apéndice 9.

Cuadro 4.23. Escenario basal representado por 6 eventos de un rango de 4.8 a 12.77 mm y evento extremo del año 2004 de 43 mm en las condiciones de vegetación y uso del suelo del área de estudio en 2003.

Evento	pp (mm)	Inicia	Descarga pico (hr)	Flujo (m <sup>3</sup> /s)	Volumen total de descarga en la salida de toda la cuenca (m <sup>3</sup> )
19 (27Jul2004)	10.68	15:35	16:15	1.47	5,250.48
42 (19Ago2004)	7.62	13:55	16:30	0.25	1,312.65
54 (5Sep2004)	5.84	23:35	23:45	0.05	875.1
84 (6Oct2004)	4.82	21:30	21:50	0.04	875.1
65 (19Sep2004)	12.44	16:15	17:00	8.53	12,251.12
91 (13Oct2004)	12.77	14:10	14:35	5.61	13,563.74
37 (7Ago2004)	42.92	15:15	16:00	237.03	494,857.74

Asimismo, este tipo de tormentas pueden considerarse el tipo de eventos más cotidianos durante la temporada de lluvias ocurrida en 2004. Mientras que el evento 37 ocurrido el 27 de agosto de ese mismo año es considerado el evento extremo de dicho año hidrológico y es también representado en su comportamiento en cuanto a precipitación y descarga mediante el modelo conforme a la vegetación y uso del suelo del año 2003 en las gráficas comparativas, en los mapas de los escenarios ambientales y en el mismo apéndice 9.

Por otra parte, el **escenario uno** corresponde a la simulación en magnitud y duración de los siete eventos mencionados suponiendo su ocurrencia en una condición proyectada de cambio de vegetación y uso de suelo conforme a la tasa decreciente de las comunidades vegetales arbóreas para el año 2013. Para la generación de dicho escenario es necesario primero retomar la clasificación de comunidades vegetales seguidas en el presente trabajo y que fueron la base de la estimación de la matriz de transición de cambio de cobertura en tres décadas.

La última transición de tipos de vegetación y usos de suelo (1994-2003) es entonces usada en un ejercicio de cadenas markovianas conforme a los procedimientos operativos de los módulos MARKOV y CA\_MARKOV del sistema Idrisi 32. El primero, analiza un par de imágenes de cobertura y genera una matriz de probabilidad de transición y una matriz de áreas de transición así como un conjunto de imágenes de probabilidad condicionada de las transiciones. El segundo, es un autómata celular combinado que genera la proyección esperada de cambio de uso de suelo considerando el criterio de proximidad espacial, mismo que puede definirse a partir de un ejercicio de análisis multicriterio-multiobjetivo y además emplea el criterio de la probabilidad de transición.

Las imágenes producidas por el módulo MARKOV reportan la probabilidad de que el píxel de una categoría de vegetación o uso del suelo se encuentre en esa misma ubicación al cabo de un número especificado de unidades de tiempo (iteración de un kernel de deconvolución). Las matrices y las imágenes resultantes de la ejecución del módulo MARKOV son empleadas por el módulo CA\_MARKOV el cual requiere, para la producción de un escenario raster de proyección de cambios de cobertura, el conjunto de imágenes de adecuabilidad (suitability) de distribución de cada una de las categorías conforme a un ejercicio de análisis multicriterio-multiobjetivo con los módulos MCE-MOLA del mismo sistema Idris 32. Para fines del escenario uno, se asume como las condiciones más adecuables, aquellas mas antiguamente registradas en el área (mapa de vegetación y uso del suelo del año 1993) pero incorporando los siguientes criterios limitantes para la deconvolución de algunos tipos particulares de vegetación y uso de suelo:

- a) Bosque Natural Templado Perenne Linearifolio.- Se distribuye solo por encima de la cota de 2,600 m.
- b) Bosque Natural Tropical Caduco Latifolio.- Se distribuye solo por debajo de la cota de 2,000 m.
- c) Usos agrícola y habitacionales. Se distribuyen solo en superficies con pendiente inferior al 20%.



Con estos insumos el módulo CA\_MARKOV estima con 10 iteraciones la proyección mas probable de estado de vegetación y uso de suelo para el año 2013 (Cuadro 4.24).

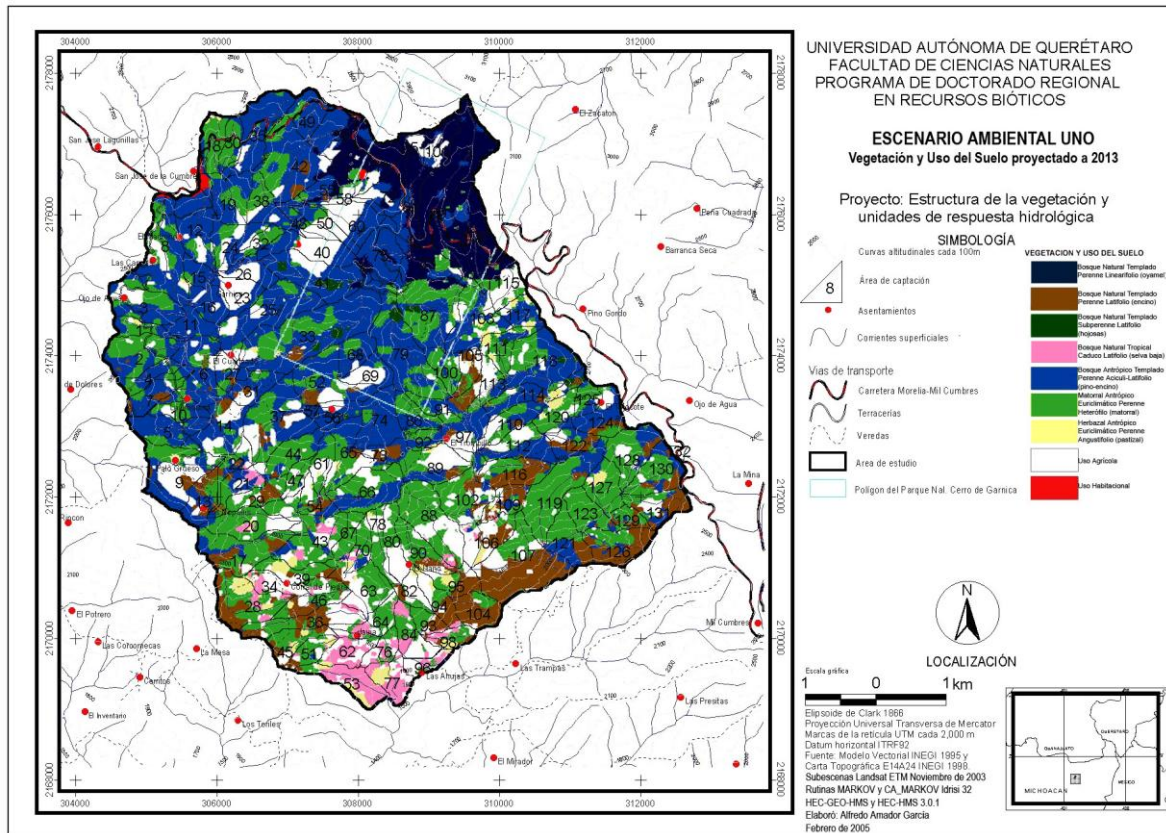
Cuadro 4.24. Matriz de transición de vegetación y uso de suelo del periodo correspondiente a 2003 y la proyección al año 2013 conforme al procedimiento MARKOV-CA\_MARKOV en el sistema Idrisi 32. Los valores enteros del 1 al 9 en color blanco representan los tipos de vegetación y uso del suelo (1. Bosque Natural Templado Perenne Linearifolio; 2. Bosque Natural Templado Perenne Latifolio; 3. Bosque Natural Templado Subperenne Latifolio; 4. Bosque Natural Tropical Caduco Latifolio; 5. Bosque Antrópico Templado Perenne Aciculi-Latifolio; 6. Matorral Antrópico Euriclimático Heterofilo; 7. Herbazal Antrópico Euriclimático Perenne Angustifolio; 8. Uso Agrícola; 9. Uso Habitacional). La superficie proporcional de un tipo de vegetación al principio de un periodo se lee al final de las columnas y su estado al final de el siguiente periodo se lee al final de los renglones.

		2003									%
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
2013	1	6.55	0.00	0.06	0.00	0.36	0.10	0.00	0.01	0.00	<b>7.09</b>
	2	0.07	4.50	0.00	0.08	2.58	1.14	0.01	0.02	0.00	<b>8.40</b>
	3	0.02	0.01	0.11	0.00	0.30	0.03	0.00	0.00	0.00	<b>0.47</b>
	4	0.00	0.22	0.00	1.55	0.13	0.50	0.05	0.03	0.00	<b>2.49</b>
	5	1.82	0.48	0.19	0.01	28.96	1.43	0.06	0.13	0.01	<b>33.09</b>
	6	0.14	2.66	0.53	0.20	4.36	20.69	0.18	0.27	0.00	<b>29.03</b>
	7	0.00	0.12	0.00	0.07	0.07	0.26	1.14	0.01	0.00	<b>1.67</b>
	8	0.07	0.27	0.00	0.44	1.10	2.74	0.22	12.74	0.00	<b>17.58</b>
	9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00	0.00	0.11	<b>0.18</b>
%	<b>10.68</b>	<b>8.69</b>	<b>8.25</b>	<b>0.89</b>	<b>2.35</b>	<b>37.87</b>	<b>26.96</b>	<b>1.66</b>	<b>13.21</b>	<b>0.12</b>	

El mapa resultante (Escenario ambiental 1) es a su vez el insumo para la recalificación de los parámetros CN y S con que es alimentado y ejecutado el modelo HEC para el conjunto de 7 tormentas utilizadas en el escenario base asumiendo que estas transcurren en igual magnitud y duración que en el año 2004 y que es incorporado al modelo conforme a la ponderación de valores de dichos parámetros como se asienta en el Apéndice 9.

El escenario 1 constituye el escenario tendencial de proyección de cambios de cobertura observados los últimos 30 años sin considerar la planeación y ejecución de programas de conservación orientados a las masas forestales que

eventualmente estén operando dentro del área de estudio. Los resultados globales de la ejecución del modelo se presentan en el Cuadro 4.25.



Una mejor resolución del mapa generado se puede observar en el Apéndice Cartográfico Digital.

Cuadro 4.25. Escenario 1, representado por 6 eventos de un rango de 4.8 a 12.77 mm y evento extremo de 43 mm con las características presentadas en el año 2004 en las condiciones de vegetación y uso del suelo del área de estudio proyectadas al año 2013.

Evento	pp (mm)	Inicia	Descarga pico (hr)	Flujo (m <sup>3</sup> /s)	Volumen total de descarga en la salida de toda la cuenca (m <sup>3</sup> )
19 (2013)	10.68	15:35	16:15	4.59	13,126.2
42 (2013)	7.62	13:55	15:25	0.98	2,187.70
54 (2013)	5.84	23:35	00:20	0.08	1,312.62
84 (2013)	4.82	21:30	21:50	0.04	875.1
65 (2013)	12.44	16:15	16:50	18.11	24,502.24
91 (2013)	12.77	14:10	14:35	13.98	26,689.94
37 (2013)	42.926	15:15	15:50	293.41	578,427.88

Para los fines del **escenario dos** se asume como más adecuada la cubierta proyectada con el anterior ejercicio y la presencia de Bosque Natural Templado

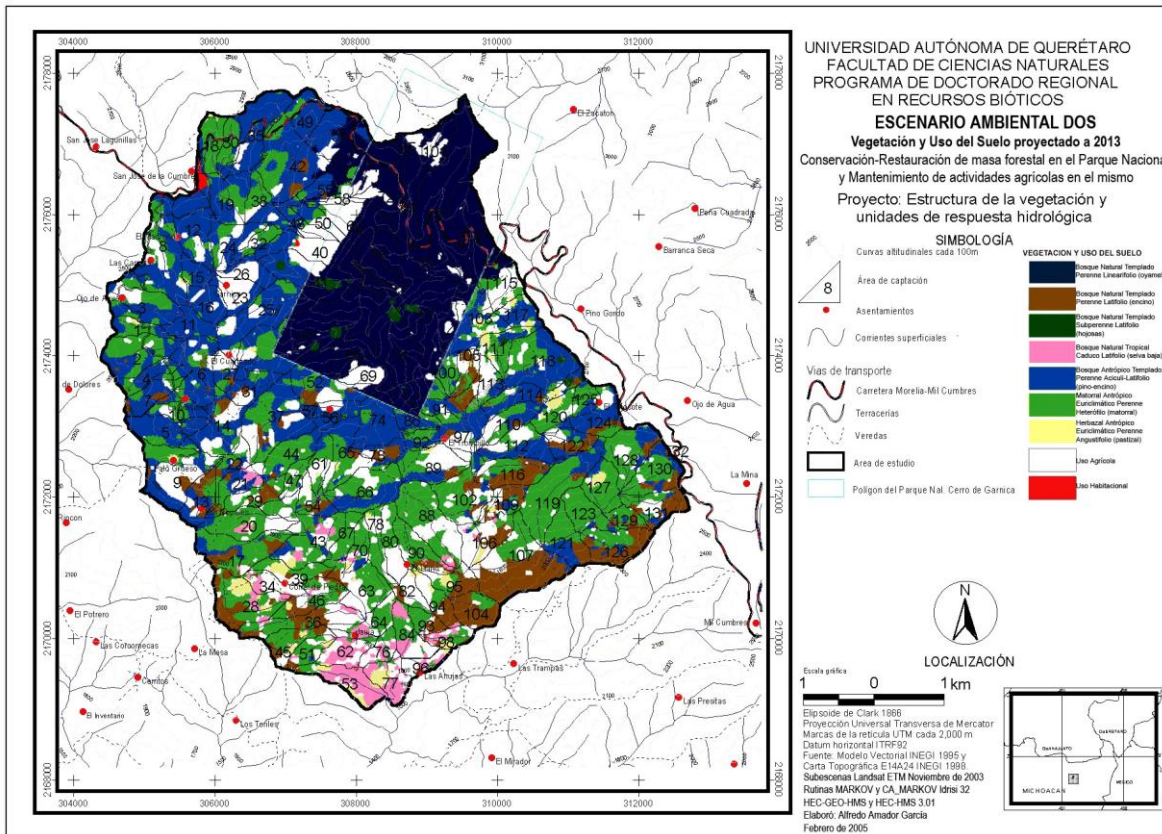
Perenne Linearifolio (oyamel) y Bosque Natural Templado Subperenne Latifolio (enclaves mesófilos) en el interior del polígono decretado como Parque Nacional Cerro de Garnica.

El escenario ambiental 2 supone las misma proyección de cambios en la distribución de vegetación y uso de suelo en el año 2013, con la diferencia que asume la aplicación del decreto federal de 1936 que declara con carácter de Parque Nacional el polígono señalado en toda la serie cartográfica presentada a lo largo del presente trabajo en los alrededores del Cerro Garnica. Este escenario **no** excluye la cubierta dedicada hasta 2003 de uso agrícola en el interior de dicho polígono.

El mapa para este escenario se generó mediante la sobreposición de una masa de Bosque Natural Templado Perenne Linearifolio (oyamel) en la superficie decretada del Parque y del uso agrícola del año 2003 de la misma porción del área de estudio a la proyección tendencial de cambios de vegetación y uso del suelo obtenidos mediante los procedimientos MARKOV y CA\_MARKOV.

De igual modo, dicha capa fue calificada con los valores de CN y S estimados en el presente trabajo, ponderados por su abundancia proporcional en cada una de las AC delineadas mediante el modulo GEO-HMS para alimentar y ejecutar en el módulo HMS con el mismo tipo de tormentas que sirvieron para el escenario base. Los valores ponderados de número de curva y valor inicial de abstracciones que fueron modificados de la base de datos del modelo se muestran en el Apéndice 10.

El mapa Escenario ambiental 2 muestra la distribución de tipos de vegetación y usos de suelo con las consideraciones señaladas. Como en los casos anteriores, una mejor resolución del mapa generado se puede observar en el Apéndice Cartográfico Digital. Los resultados globales de este ejercicio se muestran en el Cuadro 4.26.



Ver mapa de escenario ambiental dos en el anexo cartográfico digital.

Cuadro 4.26. Escenario 2, representado por 6 eventos de un rango de 4.8 a 12.77 mm y evento extremo de 43 mm con las características presentadas en el año 2004 en las condiciones de vegetación y uso del suelo del área de estudio proyectadas al año 2013 considerando una masa forestal conservada dentro del polígono del área decretada como Parque Nacional.

Evento	pp (mm)	Inicia	Descarga pico (hr)	Flujo (m <sup>3</sup> /s)	Volumen total de descarga en la salida de toda la cuenca (m <sup>3</sup> )
19 (2013)	10.68	15:35	16:15	4.23	12,251.12
42 (2013)	7.62	13:55	15:25	0.88	1,750.16
54 (2013)	5.84	23:35	01:05	0.08	1,312.62
84 (2013)	4.82	21:30	21:50	0.04	875.1
65 (2013)	12.44	16:15	16:50	17.05	23,189.62
91 (2013)	12.77	14:10	14:35	13.06	25,377.32
37 (2013)	42.926	15:15	15:50	288.66	569,239.54

Las Figuras 4.15 a 4.21 muestran los comparativos de hietogramas e hidrogramas de los escenarios base, uno y dos, en tanto que los valores resultados de estas simulaciones pueden consultarse en el Apéndice 9.

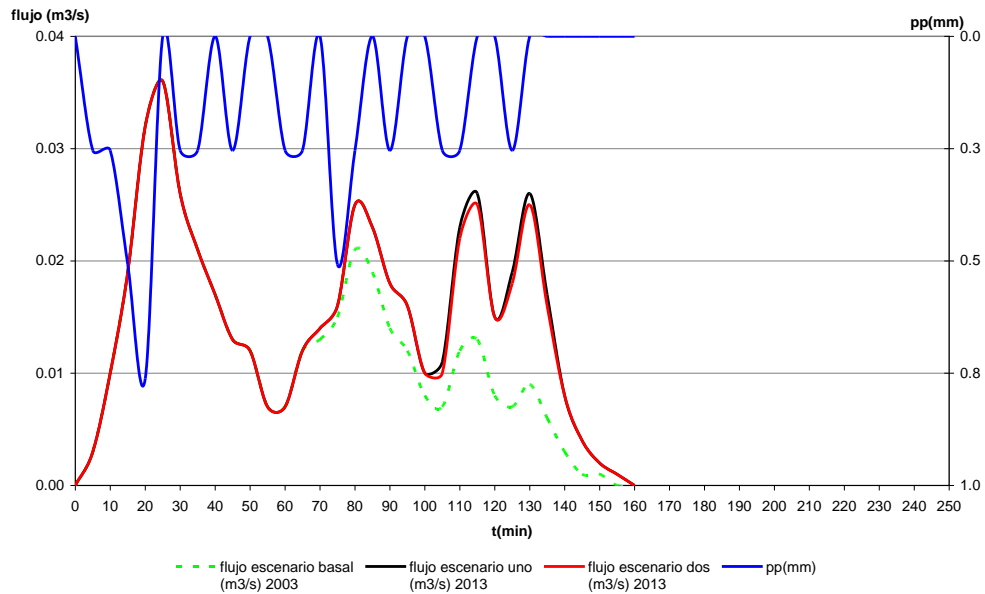


Figura 4.15. Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 4.8 mm que trascurre en 1.8 horas en el área de estudio, como el evento 84 del 6 de Octubre de 2004.

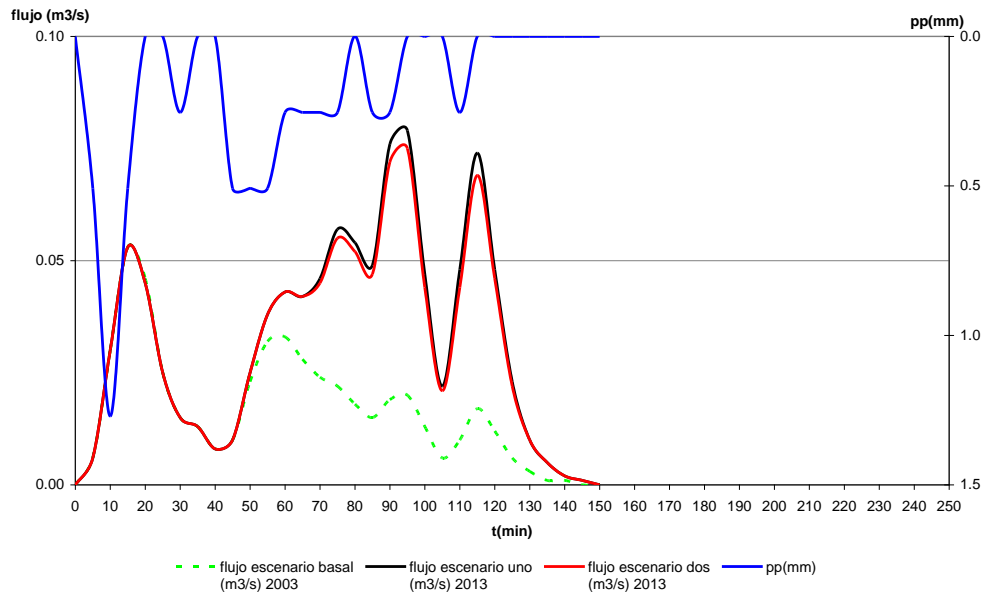


Figura 4.16. Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 5.8 mm que trascurre en 2 horas en el área de estudio, como el evento 54 del 6 de Octubre de 2004.

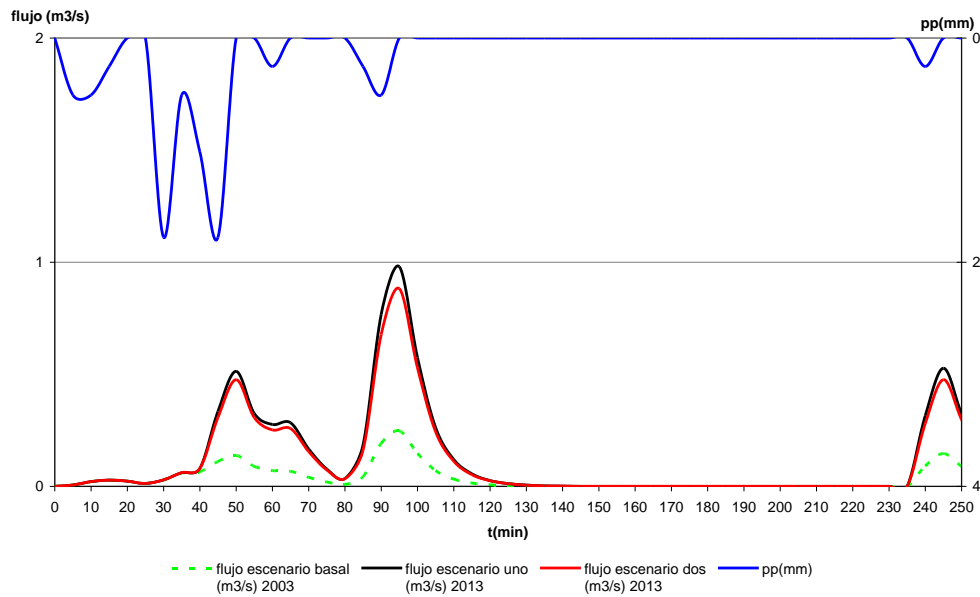


Figura 4.17. Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 7.6 mm que transcurre en 4 horas en el área de estudio, como el evento 42 del 19 de Agosto de 2004.

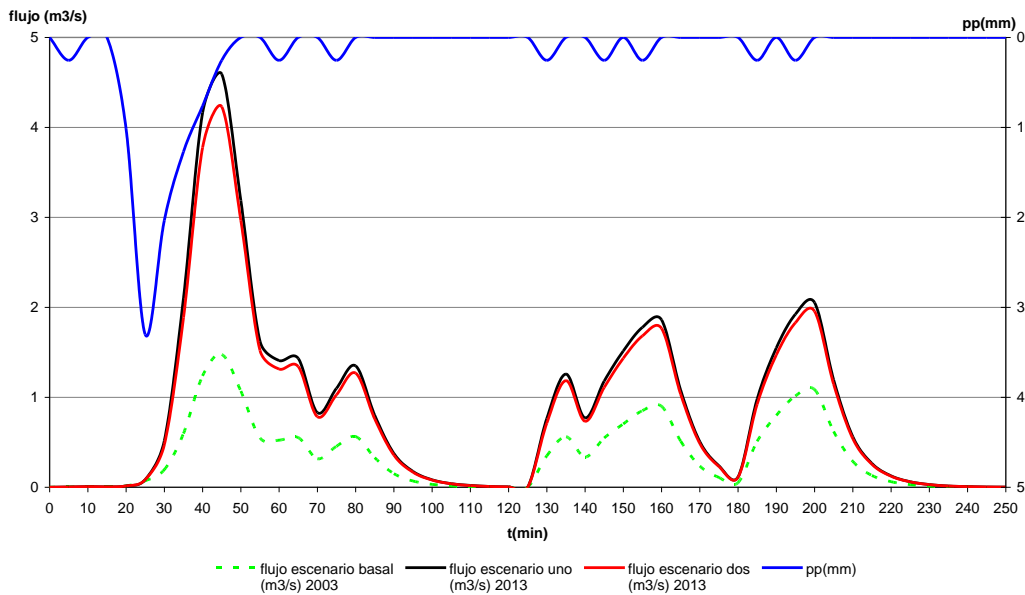


Figura 4.18. Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 10.6 mm que transcurre en 3.2 horas en el área de estudio, como el evento 19 del 27 de Julio de 2004.

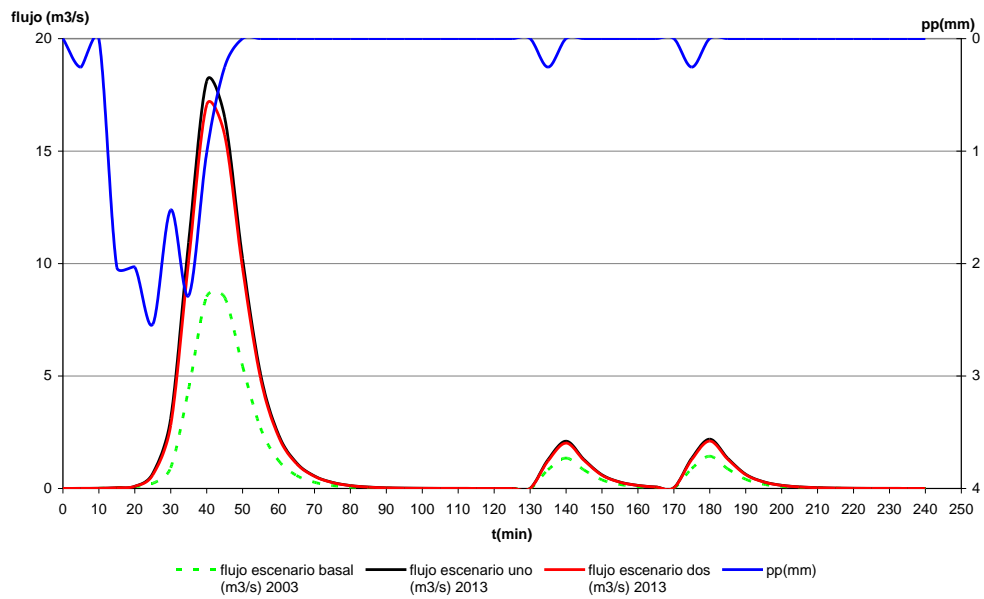


Figura 4.19. Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 12.4 mm que transcurre en 2.9 horas en el área de estudio, como el evento 65 del 19 de Septiembre de 2004.

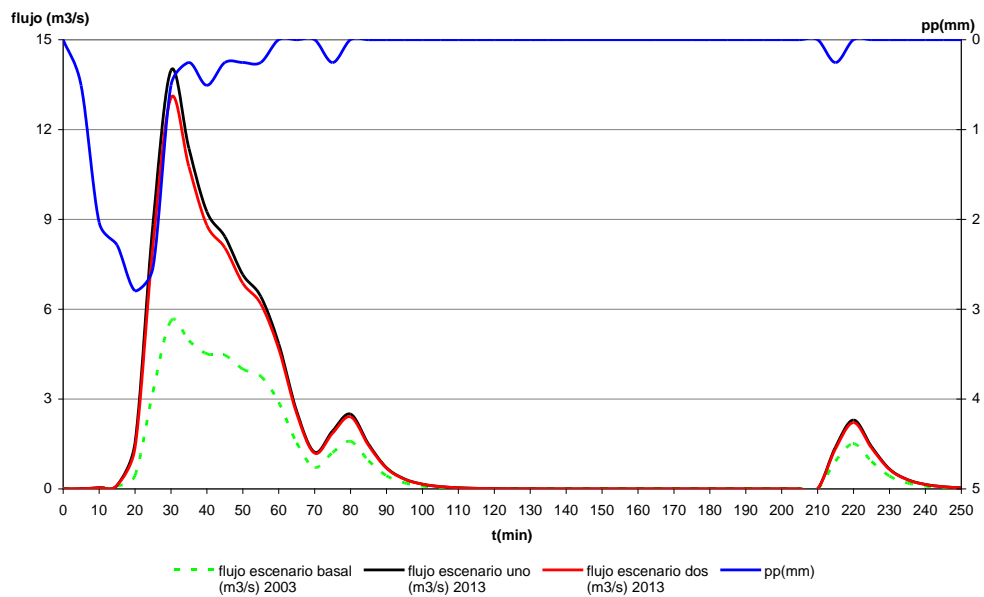


Figura 4.20. Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 12.7 mm que transcurre en 3.5 horas en el área de estudio, como el evento 91 del 13 de Octubre de 2004.

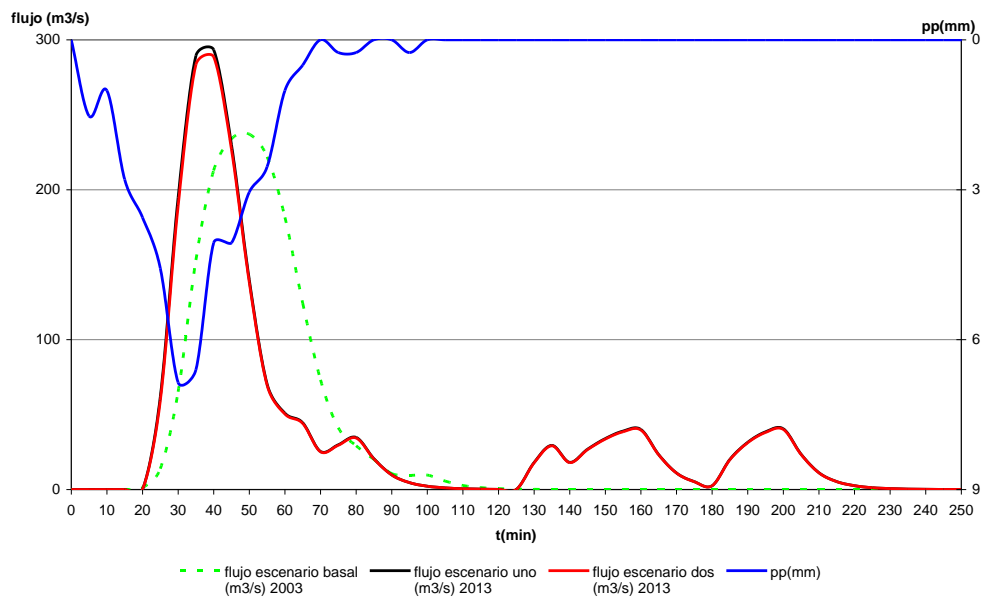


Figura 4.21. Hidrogramas comparativos de los tres escenarios generados para una tormenta de 42.9 mm que transcurre en 1.5 horas en el área de estudio, como el evento 37 del 7 de Agosto de 2004.

## 4.7 Discusión

### 4.7.1. Estructura de la vegetación.

Diversos descriptores de la estructura de la vegetación pueden utilizarse para una cuantificación de una parte o del total de la comunidad, aunque más generalmente son contextualizados a partir de la estructura de la composición florística ya que generalmente se usan las dimensiones de las especies o la magnitud de sus componentes dominantes a través de: La Cobertura o proporción de terreno ocupada por la proyección de las partes aéreas de los individuos (Knowles et al. 1999, Brown et al. 2000); El Área basal, o superficie de una sección transversal del tallo o tronco del individuo, generalmente a 1.3 m del suelo y que se expresa como superficie vegetal por unidad de superficie de terreno (Greigh-Smith 1983), La Densidad (número de individuos de una especie en un área determinada (Mueller-Dumbois y Ellenberg 1974); La Altura, que se determina por individuo desde su base en contacto con la superficie del suelo hasta la parte mas extrema



de su copa. También, puede referirse a la altura promedio de las especies dominantes que forman un estrato más o menos uniforme (Neuman y Starlinger 2001); o finalmente, al Índice de Área Foliar que representa la superficie activa de un lado de las hojas por unidad de área (Scurlock et al. 2000).

Numerosas experiencias han mostrado ser exitosas en la automatización de procesamiento digital de imágenes de satélite para el reconocimiento de atributos de la vegetación ligados directamente a un aspecto fundamental de su dinámica hidrológica: la evapotranspiración actual (Fassnach, K.S. et al. 1997, Carlson & Ripley 1997, Caselles et al. 1998, Olioso et al. 1999, Boegh et al. 1999, Boegh et al. 2002, Cheng et al. 2002, y Mendoza 2002). De igual modo, la estimación de atributos estructurales de la vegetación, principalmente biomasa, densidad y cobertura han sido ampliamente documentados en ese mismo contexto (St-Onge & Cavayas 1997, Martin et al. 1998, Gemmell 1999, Wulder et al. 2000, Gill et al. 2000, Mäkelä & Pekkarine 2001, Gemmell et al. 2001, Muinonen et al. 2001, Godin 2001, Sabol et al. 2002, Tomppo et al. 2002, Pouliot et al. 2002 y Wasseige & Defourny 2002).

Así, es posible replicar algunos procedimientos criticados por ser altamente demandantes de tiempo y de recursos, pero que constituyen los ejercicios más precisos para la caracterización multi-dimensional de la estructura del dosel. Estos aplican simultáneamente tanto sofisticadas herramientas de teledetección que capturan la organización vertical de volúmenes complejos, así como información censal de largo plazo, sobre la base de análisis de geometría de fractales (Blair et al. 1999, y Godin 2001). Pero, más allá del objetivo único de alcanzar una descripción detallada del arreglo espacial de las especies y la abundancia de cada una de ellas, la caracterización estructural básica de las comunidades vegetales permite derivar importantes aspectos de análisis de su dinámica y función en el proceso de interceptación.

La propuesta que se presenta en este trabajo, parte del reconocimiento del debate sostenido de antaño por diversos enfoques seguidos para el análisis y la clasificación de las comunidades vegetales y representa una alternativa para uniformizar las nomenclaturas de las comunidades vegetales de la entidad, ofreciendo la posibilidad de espacializar categorías que sintetizan las características más relevantes de los rasgos fisonómico-estructurales, de composición florística y afinidad climática de las comunidades vegetales.

Como lo señalan Velázquez y Bocco (1994) y Turner et al. (1995), las actividades humanas han sido reconocidas como una importante fuerza modeladora de la biosfera que actualmente -más que las fuerzas naturales- son responsables de la mayoría de los cambios en la cobertura del suelo. Por tanto, cobra vigencia la implementación de un sistema de clasificación de la vegetación que permita hacer comparables los estudios realizados desde diversos enfoques, a diferentes escalas y para distintos momentos en la entidad y en el resto de nuestro país, pero que además, sea útil en la implementación de pronósticos relacionados con las transformaciones ambientales que implementan las actividades humanas.

Es en este sentido donde destaca la utilidad de la propuesta en el ámbito del modelamiento hidrológico, ya que abre posibilidades para establecer las adecuaciones necesarias en las que la descripción de los atributos estructurales de la comunidad vegetal (por ejemplo altura y cobertura) a distintas escalas espaciales dentro de una misma categoría fisonómica, proporcionen información para estimar la capacidad de almacenamiento de agua en el dosel para ejercicios de modelamiento.

#### 4.7.2 Intercepción

Dentro de la enorme diversidad de estudios realizados sobre el tema de intercepción destacan los de Swank et al. 1972, Cantú y Okumara 1996, Asdak et al. 1998, Carlyle-Moses y Price 1999 y Schellekens et al. 1999, en virtud de que reportan diversos atributos estructurales de las comunidades vegetales en que

desplegaron sus ejercicios y de los que al menos uno de tales parámetros posibilita comparaciones con los resultados del presente trabajo (Cuadro 4.28).

Cuadro 4.28. Relación de resultados sintéticos de otros trabajos relacionados con interceptación.

Autor(es)	Comunidad vegetal (especie-s dominante-s)	Área basal del estrato arbóreo	Densidad	Cobertura de copa promedio	LAI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	pp anual	Intercepción	TF (pp directa)	SF (flujo caulinar)
Swank et al. 1972	<i>Pinus taeda</i> . Carolina del Sur, EUA	34.8 m <sup>2</sup> /ha	250 Ind./ha	-----	-----	1,371 mm	Hasta 26%	Hasta 85%	Hasta 2%
Cantú y Okumara 1996	<i>Quercus serrata</i> - <i>Sasa paniculata</i> . Okayama, Japón	-----	-----	21.5 m <sup>2</sup>	5.2	2,197 mm	Hasta 40%	Hasta 72%	Hasta 10%
Asdak et al. 1998	Bosque tropical. Kalimantana, Indonesia	-----	-----	-----	-----	2,201 mm	Hasta 12%	Hasta 52%	Hasta 1.4%
Carlyle-Moses y Price 1999	<i>Quercus ruba</i> . Ontario, Canadá	28.3 m <sup>2</sup> /ha	513 Ind./ha	-----	-----	785 mm	Hasta 21%	Hasta 76%	Hasta 4.30%
Schellekens et al 1999.	Bosque tropical. Luquillo, Puerto Rico.	-----	-----	-----	6.4	3,500 mm	Hasta 70%	Hasta 79%	Hasta 2.3%
Presente trabajo	<i>P. pseudostrabus</i> - <i>Q.laurina</i> . Michoacán, México.	102 m <sup>2</sup> /ha	421 Ind./ha	37 m <sup>2</sup>	5.3 a 7.1	1,344 mm	Hasta 47%	Hasta 67.5%	Hasta 0.5%

La proporción de la precipitación total incidente que representa las pérdidas por interceptación estimadas en el presente estudio, sobrepasa las estimaciones realizadas en comunidades vegetales de condiciones templadas. No obstante lo anterior, en la literatura es común encontrar también cifras contrastantes como las presentadas por Asdak et al. 1998 y Schellekens (1999) para bosques tropicales.

Por los rasgos de cobertura y LAI, la comunidad trabajada por Cantú y Okumara (1996) constituiría la referencia con características más semejantes al presente trabajo. La cifra de LAI presentada en el cuadro 4.28 se obtiene del despeje y solución de la ecuación 7. El resto de atributos estructurales señalados como cobertura de copas y densidad corresponden a los de la comunidad en que se ubicaron los lotes experimentales, mismos que fueron dispuestos en la condición de mayor heterogeneidad y riqueza específica. Esa es la razón también de la elevada cifra reportada en este trabajo de área basal.

Dichas características corresponden a una comunidad con capacidades de intercepción excepcionales en el área de estudio, por su altamente estructurada conformación de estratos, dimensiones de las copas de sus individuos y reducida porosidad óptica en su interior (Figura 4.22), lo que aunado a una menor precipitación que la reportada por Cantú y Okumara (Op. Cit.) resulta comprensible una cifra apenas 7% superior en intercepción y 4.5% inferior en precipitación directa (la que alcanza el piso de la comunidad) a la señalada por dichos autores.

Por otro lado, la proporción de escurrimiento fustal (SF) evaluado representa una discrepancia significativa del presente trabajo con el resto de los autores señalados. Sobre este particular, Steinbuck (2002) estudió diversos rasgos de la corteza de árboles de un Bosque templado incluyendo encinos y secuias y otros rasgos alométricos de tales individuos, identificando una mayor correlación entre la positividad de posición de las ramas, es decir formando un ángulo de pendiente positiva con el tronco principal, y el incremento en SF que con las características propias de profundidad o aspereza de los troncos.



Figura 4.22. Interior de la comunidad vegetal en que fue estimada la Intercepción en el presente estudio.

En el presente estudio las principales especies muestreadas en SF fueron *Abies religiosa* y *Pinus pseudostrobus*, dos taxa del grupo de las gimnospermas que

presentan ramificación monopódica, es decir, cuyas ramas forman aproximadamente un ángulo de  $90^\circ$  y por tanto una pendiente cercana a 0 con el tronco principal y que por ende contribuyen con una muy baja proporción de escurrimientos en el total de SF. Además un rasgo sobresaliente de estos y de los individuos de la especie *Quercus laurina* fue la abundancia de especies epífitas sobre ramas y troncos que muy probablemente contribuyen a abatir de manera importante y a escala fustal los escurrimientos en esta porción de los individuos.

No obstante lo anterior, se considera pertinente la medición detallada de este parámetro ya que no se excluye la omisión y comisión de errores del mismo en el presente trabajo.

Respecto a los valores de precipitación directa (TF), los trabajos revisados coinciden en señalar que se trata de uno de los aspectos que muestra mas variabilidad temporal y espacial incluso dentro de idénticas intensidades de tormentas. Asimismo, existe una coincidencia en señalar que la principal fuente de incremento en dicho parámetro se debe al incremento de boquetes en el dosel. En este sentido Asdak et al. (1998) observaron además un efecto interesante en el sentido de que si bien con las prácticas de aclareo se disminuye la intercepción por disminución de la capacidad de almacenamiento de agua en el dosel (S), con dichas acciones se generan también efectos de borde lo que repercute en el aumento de turbulencia del aire y por tanto se incrementa la capacidad evaporadora del viento. Solo el trabajo de Schellekens et al. (1999) incorpora mediciones específicas para la variación del efecto de evaporación y sus repercusiones en el secado del dosel de una comunidad sujeta a vientos marítimos, lo que lo conduce a evaluar una tasa de intercepción relativamente alta (52 hasta 70% de la precipitación total).

Suponiendo entonces un efecto preponderante de la evaporación y del incremento de sus efecto secante del dosel en condiciones de presencia de viento y en contacto con y rodeadas por comunidades con boquetes y bordes, se explicaría

más la relativamente alta tasa de intercepción evaluada en el sitio experimental de este estudio.

#### 4.7.3 Respuesta Hidrológica

Conceptualmente, las definiciones de Unidades de Respuesta Hidrológica han contribuido a entender distintos aspectos del comportamiento de el escurrimiento relacionados con la distribución espacial de rasgos del ambiente que determinan el fenómeno físico del escurrimiento en si mismo. De ese modo, variables puramente físicas del terreno como la pendiente son incorporadas en dicha definición con una ponderación alta. Sin embargo en la práctica, para el presente estudio fueron en virtud de que los atributos físico-hidrológicos de las superficies son las que gobiernan dicho fenómeno, la información espacial para la calibración-validación de los modelos empleados para el cálculo de escurrimiento y flujo se convirtió en una problema de escala de resolución espacial de la o las subunidades hidrológicas a considerar y en los que dicha información fue factible incorporar de manera ponderada por abundancia proporcional de los parámetros por subunidad.

Asi, aunque es relativamente sencillo la medición de abstracciones para las distintas condiciones de vegetación y uso del suelo para las condiciones de las AC experimentales y la medición de flujos en estas porciones del área de estudio, fue necesario la interpolación de valores puntuales obtenidos a nivel de lotes y de corregir dichas estimaciones en los ejercicios de calibración del modelo HEC a valores que no se tienen muestreados experimentalmente.

El concepto adecuado entonces en este estudio corresponde más aproximadamente al manejado por Karnoven et al. (1999) como “hydrologically similar units” (HSU) que representan áreas agregadas de comportamiento hidrológico similar por su cobertura, suelo y atributos hidrológicos de la unidad.

En este sentido no fue posible lograr la expectativa planteada en el presente estudio de obtener resultados experimentales con correspondencias o discrepancias en cuanto a tales comportamientos de respuesta hidrológica en unidades con atributos hidrológicos similares (superficie, pendiente, densidad de drenaje) en los que la diferencia en cobertura vegetal constituyera la variable de los ejercicios. Lo anterior en virtud de que en si mismas, las tormentas muestreadas con mas similitud en una AC y otra mostraron una gran variabilidad en su comportamiento y como solo se contó con un dispositivo automatizado de almacenamiento de datos (data logger de nivel) que estuvo cambiándose de vertedor durante la temporada de observada nunca pudo observarse la magnitud y velocidad de flujos para los mismos eventos.

No obstante lo anterior, se considera que los ejercicios fueron apropiados para la calibración del modelo HEC en distintas condiciones de tormentas para al menos dos distintas condiciones de unidades de respuesta hidrológica (URH o HSU).

En ese sentido resulta importante el trabajo de Donnelly-Mackowecki y Moore (1999) quienes estudiaron dos cuencas de dimensiones relativamente pequeñas (38.3 y 19.8 ha respectivamente) con variaciones pequeñas en cobertura de vegetación densa (98 y 100% de la superficie) sujetas a un régimen de precipitación anual de entre 2,000 y 2,500 mm y en donde aplicaron el modelo de Gash para la determinación de abstracciones por el dosel y midieron mediante vertedores en forma de “v” las variaciones de flujos en tormentas seleccionadas para calibrar un modelo no distribuido y el modelo distribuido TOPMODEL. Encontraron ajustes adecuados de ambos modelos en la simulación de tormentas de sus denominados “niveles 1 y 2” correspondientes a eventos de menos de 10 mm en tanto que para eventos por arriba de esa magnitud los mejores ajustes los generó el modelo distribuido.

En el presente estudio se muestran resultados de abstracciones por comunidades vegetales de una zona sujeta a un régimen de precipitación de aproximadamente

1,344 mm con dos AC experimentales de 26 y 17 ha respectivamente y con cuyos valores observados de precipitación y flujos medidos en series de tiempo con intervalos de 5 minutos fue calibrado el modelo HEC con ajustes principalmente relacionados con la magnitud de las abstracciones iniciales y el valor de número de curva de un modelo en origen no distribuido (SCS) pero que en los años recientes la literatura ha sido señalada la posibilidad de espacializar.

Sin embargo el módulo GEO-HMS no permitió la proyección al sistema de coordenadas en los intentos realizados para la generación de los insumos raster al módulo HMS, de manera que fue utilizado el enfoque de ponderación y alimentado de manera manual al sistema los valores obtenidos de una síntesis por promedio de valores de píxeles de las áreas de captación generadas por el módulo GEO-HMS, las cuales coinciden ampliamente con las definidas y caracterizadas en el presente trabajo.

#### 4.7.4. Los escenarios generados

En los trabajos consultados que aplicaron procedimientos de cadenas markovianas para la proyección de cambios de estado de uso del suelo y vegetación (López 1999, Korotkov et al. 2001, Weng 2002, Paegelow et al. 2003 ) coinciden en calificar al procedimiento como uno sencillo o simple pero útil para describir cambios de estado en el tiempo de un proceso que es función de una densidad de probabilidad (PDF por sus siglas en inglés). Korotkov et al. 2001, afirma incluso que el calificativo “simple” no es sinónimo de “inadecuado” o “malo” y que si en cambio es exitoso en proyectar dinámicas estocásticas aun cuando en su trabajo deja de manifiesto que aspectos como la dinámica sucesional no necesariamente se ajusta a un modelo de cadenas markovianas.

En el área de estudio la proyección de las tendencias de cambios de uso de suelo simplemente mantiene las proporciones de cambio observadas las décadas anteriores y los productos intermedios simplemente identifican esa densidad de probabilidad en el espacio para que la transformación tome lugar. El insumo



intermedio de análisis multicriterio de adecuabilidad de operación de tales cambios es sin duda el aspecto más débil del procedimiento, pero el más complejo en su estructuración.

No obstante lo anterior y reconociendo la necesidad de enriquecer este tipo de ejercicios con criterios y ponderaciones de los mismos de una manera más detallada, en términos generales puede señalarse que la proyección de cambios al año 2013 es precisamente eso, una proyección lineal simple, ponderada y evaluada mediante un análisis multicriterio que es también un modelo de una suma lineal ponderada.

Sin embargo, el escenario basal parte de una clasificación supervisada de una subescena Landsat ETM del año 2003 y de valores de series de tiempo de precipitación y flujos de las tormentas con las que previamente se corrieron ejercicios de calibración del modelo HEC.

#### **4.8. Conclusiones**

Los descriptores de la estructura de la vegetación enunciados en la literatura revisada y el presente trabajo, relacionados con la identificación de atributos en materia de respuesta hidrológica son principalmente aquellos que intervienen en las propiedades de intercepción de la lluvia. Estos han sido señalados como:

- La proporción de área cubierta por el dosel (cobertura), la cual tiene una manera muy práctica de relacionarse conforme a la ecuación de Lambert con el Índice de Área Foliar y los valores que en campo pueden medirse de manera también muy práctica siguiendo el concepto de Porosidad Óptica del Dosel.

- La densidad y dimensiones de copa de los individuos es otro componente que se señala en la literatura y que eventualmente puede usarse aquí para explicar los altos valores de intercepción observados en el presente estudio.
- Invariablemente la composición de las comunidades es un aspecto de gran importancia que salvo contadas excepciones se desatiende en los trabajos publicados. En el presente estudio fue abordado este aspecto, considerando incluso la propuesta de un sistema de clasificación fisonómico-estructural de la vegetación que puede ser empleado a distintas escalas de observación y monitoreo para la determinación de los parámetros más adecuables para ejercicios de modelamiento ambiental, y asume entonces eventualmente un enfoque de clasificación fisonómico-estructural-funcional en el sentido del papel hidrológico que desempeña la vegetación.

Los parámetros de proporción de positividad y rugosidad de las ramas y tronco indiscutiblemente repercuten en las estimaciones de escurrimiento fustal (SF), se sabe que es incluso de mayor relevancia en términos de contribución del total de la precipitación incidente las tallas y el número de troncos de una comunidad. Rodales de avanzada edad con individuos corpulentos de gran superficie fustal contribuyen mucho menos al que comunidades jóvenes con numerosos individuos de troncos con diámetros más pequeños. Aunque en el presente trabajo no se realizaron pruebas estadísticas sobre este aspecto, otro factor que influye en lo anterior es la abundancia de especies epifitas: líquenes, musgos, helechos y orquídeas que probablemente se presentan en mayor abundancia en individuos de edad avanzada y que contribuyen a abatir aun más los valores de este componente del balance hídrico en su fase de contacto con la vegetación y sobre el que muy poco se ha escrito.

El cambio de uso de suelo, la apertura de boquetes de manera natural o inducida por las actividades humanas, los cambios en la estructura de las comunidades vegetales que pueden incluir transformaciones a la composición y características

del dosel, generan variaciones en la capacidad de almacenamiento de agua en este, y probablemente también, generan modificaciones aerodinámicas que afectan la evaporación de agua en el mismo.

Los atributos físicos y bióticos de una cuenca pueden parametrizarse en un sentido hidrológico asumiendo los conceptos de URH (*sensu* SCS 1972 citado por Chow et al. 1994, Hay et al. 1993 y Neitsch et al. 2001) o de Unidad hidrológicamente similar (HSU *sensu* Karnoven 1999) para la calibración con los flujos observados y valores de precipitación en series de tiempo, para alimentar un modelo de simulación que genere escenarios ambientales relativos a las consecuencias que pueden tener las distintas acciones a emprender sobre dicha cuenca.

Los ejercicios de simulación de escurrimiento generados a partir del escenario 1 (proyección del cambio de uso de suelo y vegetación conforme la tendencia los últimos 20 años) y 2 (misma proyección de cambios de vegetación y uso del suelo en la cuenca pero restauración y conservación de la masa forestal en el área decretada), muestran con respecto al escenario basal (uso del suelo y vegetación en el año 2003) que:

- tormentas (como la del 6 de octubre de 2004) de menos de 5 mm en poco más de 2 hrs. no representarían modificación alguna en el tiempo al pico de la descarga ni de la magnitud de esta ni del flujo total de la cuenca por concepto a dicho evento.
- tormentas (como la del 5 de septiembre de 2004) que alcanzan casi los 6 mm en menos de 2 hrs. pueden retrasar en 20 min. (escenario 1) y hasta en 1.5 hr (escenario 2) el tiempo del pico de la descarga, prácticamente duplicando la magnitud total del flujo. El retraso en los tiempos al pico en los escenarios 1 y 2 seguramente obedece al retardo inherente del movimiento de una mayor masa de agua dentro de la cuenca.

- tormentas (como la del 19 de agosto de 2004) que alcanzan casi los 8 mm en 4 hrs. pero que el 90% de la precipitación ocurre las primeras 1.5 hrs. puede reducir en casi 1 hr. el tiempo al pico de la descarga en los escenarios uno y dos conforme al esperando en el escenario basal. En este caso sin embargo si se aprecia ya el efecto de reducción de la tasa de flujo al pico de la descarga y del flujo total por concepto de la conservación de las comunidades de linearifolios en el Parque Nacional.
- tormentas (como la del 19 de julio de 2004) que rebasan ligeramente los 10 mm en 3.25 hrs. mantienen constantes los tiempos al pico de la descarga pero cuadruplican los valores de tasas de flujo en los escenarios uno y dos con respecto al escenario basal y generan poco mas del doble de flujo total en ambos escenarios. Sin embargo, el efecto de conservación de la comunidad de linearifolios en el Parque Nacional en el escenario dos vuelve a representar una disminución en aproximadamente 1,000 m<sup>3</sup> de flujo total de descarga con respecto al escenario uno.
- tormentas (como las del 19 de septiembre y 13 de octubre de 2004) de alrededor de 12 mm que transcurren en aproximadamente 3 hrs y que pueden todavía ser considerados eventos convencionales para el régimen de precipitación en el área, e incluso eventos extremos de hasta 43 mm, pueden verse reducidos hasta en 10 min. su tiempo al pico de la descarga y prácticamente duplicar los flujos al pico y los flujos totales con respecto al escenario basal. En estos tres últimos casos, el efecto de la conservación de la comunidad de linearifolios en el polígono decretado sigue significando una reducción global de aproximadamente 1,000 m<sup>3</sup> para el caso de las tormentas de 12 mm y de hasta 10,000 m<sup>3</sup> de flujo total con respecto al escenario proyectado de cambio de vegetación y cobertura para el año 2013.

Los escenarios mostrados en este trabajo muestran que la puesta en ejecución de un decreto que data de hace 70 años para proteger la parte alta de una cuenca forestal como la del río Bálsas-Zirándaro, dada la proyección de cambios de vegetación y uso del suelo en la región no serían suficientes pero si representarían un abatimiento significativo de los flujos al pico de la descarga y flujos totales derivados de eventos extremos que ocurrieran en el año 2013 con una magnitud de 43 mm y que transcurrieran en 1.5 hr conforme a la tendencia proyectada de cambios de uso de suelo y cobertura en la cuenca.

No obstante lo anterior, en ambos escenarios simulados que consideran ya sea una proyección tendencial u optimista en el cambio de uso de suelo y la estructura de las comunidades vegetales, los incrementos relativos del escurrimiento con respecto al escenario base, muestran que es indispensable en el corto plazo, no solo programas orientados a la protección y conservación de las partes altas de esta cuenca. También se hace necesario el diseño y ejecución de programas que como concepto general fomenten el mantenimiento de las comunidades vegetales más altamente estructuradas, incrementen los procesos de intercepción y con ellos la evapotranspiración, reduzcan el escurrimiento y aumenten la fracción de humedad retenida en la misma.

## LITERATURA CITADA

- Amador G.A., Torres, R.L., Aguirre, L, R., Ortega R. J.M. Villaseñor G. F., Ayala G. J.M. y Sosa G. N. 2002. *Estudio Técnico Justificativo para el Proyecto de Línea de Transmisión Eléctrica Agustín Millán II-Volcán Gordo (400 kV)* México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Comisión Federal de Electricidad.191 pp.
- Amador, G.A. 2000. *Simulación Dinámica del Impacto Ambiental por Actividades Agrícolas en la Cuenca de Patzcuaro, Mich.* Tesis Maestría. Facultad de Biología. UMSNH. 110 p.
- Arteaga, R.E., Aranza, M.O.E., Sánchez, A.M.M., Reyes, R. A., García S.M. y Luna R.J. 2001. *Evaluación experimental de expresiones empíricas de gasto en vertedores rectangulares.* XI. Congreso Nacional de Irrigación. Artículo: ANEI-S60123. Guanajuato. México. 9 pp.
- Asdak, C. , Jarvis, P.G, Gardingen, P. and A. Fraser. 1998. *Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of Central Kalimantan, Indonesia.* Journal of Hydrology 206: 237-244.
- Bergström, S. y L.P.Graham. 1998. *On the scale problem in hydrological modelling.* Journal of Hydrology 211:253-265.
- Blair, J. B., D. L. Rabine, and M. A. Hofton. 1999. *The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography.* ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 54: 115-122.
- Boegh, E., Soegaard, H. and A. Thomsen. 2002. *Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance.* Remote Sensing of Environment 79 (2-3):329-343.
- Boegh, E., Soegaard, H., Hanan, N. and L. Lesch. 1999. *A Remote Sensing Study of the NDVI-Ts Relationship and the Transpiration from Sparse Vegetation in the Sahel Based on High-Resolution Satellite Data.* Remote Sensing of Environment 69 (3):224-240.
- Bowling, O.P and K.M. Strzepek 1997. *Examining the Impacts of Land-Use Change on Hydrologic Resources.* International Institute for Applied Systems Analysis. INTERIM REPORT IR-97-031/June. Laxenburg, Austria. 39 pp.
- Brooks, K.N., Folliott, P.F. Gregersen, H.M and J.L. Thames. 1991. *Hydrology and the management of watersheds.* Iowa State University Press. Ames, Iowa. 392 pp.

- Brown P.L., Doley, D. and R.J. Keenan. 2000. *Estimating tree crown dimensions using digital analysis of vertical photographs*. Agricultural and Forest Meteorology 100 (2000) 199-212.
- Bruijnzeel 1989. *(de)forestation and dry season flow in the tropics. A closer look*. Journal of Tropical Forest Science 1, 229-243.
- Calder , I.R. 1977. *A model of transpiration and interception loss from a spruce forest in Plynlimon, central Wales*. Journal of Hydrology 33: 247-265.
- Cantú-Silva, I. and T. Okumura. 1996. *Rainfall partitioning in a mixed white oak forest with dwarf bamboo undergrowth*. Journal of Environmental Hydrology. 4: 1-16.
- Cantú-Silva, I. y H.R. González 2002. *Propiedades Hidrológicas del dosel de los bosques de pino-encino en el noreste de México*. Ciencia UANL. V(1):72-77.
- Carlson, T.N. and Ripley, D.A. 1997. *On the relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Lead Area Index*. Remote Sensing of Environment 62 (3):241-252.
- Carlyle-Moses, D.E. and Price A.G. 1999. *An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand*. Journal of Hydrology 214 (1999)103-110.
- Caselles, V., Artigao, M.M., Hurtado, E., Coll, C. and A. Brasa. 1998. *Mapping Actual Evapotranspiration by Combining Landsat TM and NOAA-AVHRR Images: Application to Barrax Area, Albacete, Spain*. Remote Sensing of Environment 63 (1) 1-10.
- Cheng, J.D., Lin, L.L. and H.S. Lu. 2002. *Influences of forest on water flows from headwater watersheds in Taiwan*. Forest Ecology and Management 165:11-28.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y L.W. Mays. 1994. *Hidrología Aplicada*. McGrawHill. México 584 pp.
- Chuvienco, E. 1990. *Fundamentos de teledetección espacial*. Rialp, S.A. Madrid. 449 p.
- Cihlar, J. and L.J.M. Jansen. 2001. *From Land Cover to Land Use: A Methodology for efficient Land use Mapping over Large Areas*. Professional Geographer, 53(2) 275-289.
- Cottam, G. and J. T. Curtis. 1956. *The use of distance measures in phytosociological sampling*. Ecology 37:451-460.

- Cox, G.W. 1990. *Laboratory Manual of General Ecology*. Brown Publishers. Dubuque, IA. 251 pp.
- Diez, P.A. 1993. *Introducción a la Percepción Remota*. Universidad Autónoma del Estado de México. México. 144 p
- Donnelly-Mackowecki, L.M. and Moore R.D. 1999. *Hierarchical testing of three rainfall-runoff models in small forested catchments*. Journal of Hydrology. 219: 136-152.
- Eastman, J.R. 1995. *Idrisi for Windows 1.0. User's guide*. Clark University. U.S.A. 14-120 p.
- Elsenbeer, H., Cassel, D.K. and Castro, J. 1992. *Spatial analysis of soil hydraulic conductivity in a tropical rain forest catchment*. Water Resources Restoration 28, 3201-3214.
- Environmental Systems Research Institute Inc. (ESRI) 1998. *ArcView 3.1 Manual de Referencia*.
- Fassnacht, K.S., Gower, S.T., MacKenzie, M.D., Nordheim, E.K. and T.M. Lillesand. 1997. *Estimating the Leaf Area Index of North Central Wisconsin Forest Using the Landsat Thematic Mapper*. Remote Sensing of Environment 61 (2):229-245.
- FGDC. 2005. *Nacional Vegetation Classification Standard Hierarchy Revisions Working Group*. Federal Geographic Data Committee, Vegetation Subcommittee. OverView July 2005. In: <http://biology.usgs.gov/fgdc.veg>
- Flores-Mata, G., Jimenez L. J., Madrigal S. X., Moncayo R. F., Takaki T. F. 1971. *Tipos de vegetación de la República Mexicana*. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección de Agrología. 59 pp.
- Franklin, J. 1995. *Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients*. Progress in Physical Geography 19,4: 474-499.
- Fulton, S. and B. West. 2001. *Aqua-3: Forestry Impacts on Water Quality*. US Environmental Protection Agency. 34 pp. In: [www.srs.fs.fed.us/sustain](http://www.srs.fs.fed.us/sustain).
- García. E. 2003. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Libros Núm. 6. México, D.F. 90 pp.
- Gash, J. H. C., 1979. *An analytical model of rainfall interception by forests*, Q. J.R. Meteorol. Soc., 105, 43–55.



- Gash, J. H. C., C. R. Lloyd, and G. Lachaud. 1995. *Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model*. Journal of Hydrology., 170, 79–86.
- Gemmell, F. 1999. *Estimating Conifer Forest Cover with Thematic Mapper Data Using reflectance Model Inversion and Two Spectral Indices in a Site with Variable Background Characteristics*. Remote Sensing of Environment 69 (2):105-121.
- Gemmell, F., Varjo, J and M. Strandstrom. 2001. *Estimating forest cover in a boreal forest test site using Thematic Mapper data from two dates*. Remote Sensing of Environment 77 (2):197-211.
- Gill, S.J., Milliken, J., Beardsley, D. and R. Warbington. 2000. *Using a Measurement Approach with FIA Vegetation Plot Data to Assess the Accuracy of Tree Size and Crown Closure Classes in a Vegetation Map of Northeastern California*. Remote Sensing of Environment 73 (3):298-306.
- Godin, J.R. 2001. *Modeling rainforest canopy architecture using functional types on Barro Colorado Island, Panama*. M.S. Thesis, University of Central Florida. Orlando, FL. 104 pp.
- González-Medrano, F. 2003. *Las comunidades Vegetales de México: Propuesta para la unificación de la clasificación y nomenclatura de la vegetación de México*. INE-SEMARNAT. México 77 pp.
- Hardy, J.L. 1981. *Data Collection by remote sensing for land resources survey*. In: Townshend J.R.G. (Ed.). *Terrain Analysis and Remote Sensing* (p16-37). George Allen & Unwin. London. 232 pp.
- Hartano, H. Prabhn, R., Widayat, A.S.E. y Asdak Ch. 2003. *Factors affecting runoff and soil erosion: plot-level soil loss monitoring for assessing sustainability of forest management*. Forest Ecology and Management 180: 361-374.
- Hay, L.E., Battaglin W. A. y G.H. Leavesley. 1993. *Modeling the effects of climate change on water resources in the Gunnison river basin, Colorado*. In: Environmental Modelling with GIS. Goodchild, M.F., Parks B. O and L.T. Steyaert (eds.). pp:172-181
- Helvy, J.D. & Patric, J.H. 1965. *Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of eastern United States*. Water Resources research. 1: 193-205.
- Herwitz, R.S. 1985. *Interception storage capacities of tropical rainforest canopy trees*. Journal of Hydrology. 77: 237-252.
- Hewlett, J.D. 1982. *Principles of forest hydrology*. University of Georgia Press Athens, Georgia. 184 pp.

- Horton, R.E. 1919. *Rainfall interception*. Month. Weather Rev. 47: 603-623.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (CGSNI-INEGI). 1978. *Carta Geológica. 1:50,000*. E14A24 Tzitzio.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (CGSNI-DGETNAL-INEGI). 1979. *Carta Edafológica. 1:50,000*. E14A24 Tzitzio.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (DGG-INEGI). 1983. *Carta de Uso de Suelo y Vegetación. 1:50,000*. E14A24 Tzitzio.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1994. Ortofoto digital escala 1:75,000, E14A24 b y e.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 1999. *Información Botánica en la cartografía temática del INEGI. Guía Normativo-Methodológica*. Dirección General de Geografía INEGI. México. 60 pp.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). 2001. Datos vectoriales carta topográfica escala 1:50 000, versión 3. E14A24 Tzitzio.
- Jackson, I.J. 1975. *The relationship between rainfall parameters and interception by tropical forest*. Journal of Hydrology. 24: 215-238.
- Karnoven, T., Koivusalo, H., Jauhiainen, M., Palko, J., and Weppling, K. 1999. *A hydrological model for predicting runoff from different land use areas*. Journal of Hydrology 217: 253-265.
- Knowles, R.L., Horvarth, G.C., Carter, M.A. and M.F. Hawke. 1999. *Developing a canopy closure model to predict overstorey/understorey relationships in Pinus radiata silvopastoral systems*. Agroforestry Systems 43:109-119.
- Korotkov, V. N., Logofet, D. O. and M. Loreau. 2001. *Succession in mixed boreal forest of Russia: Markov models and non-Markov effects*. Ecological Modelling 142: 25-38.
- Leopold, A. S. 1950. *Vegetation zones of Mexico*. Ecology 31:507-518.
- Lillesand, T and R. Kiefer. 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley. U.S.A. 721 p.
- Link, T.E 2002. *The interception dynamic of a seasonal temperate rainforest*. Research & Extension Regional Water Quality Conference 2002. 3 pp.
- Linsley, R. K.; M.A. Kohler y Paulhus, J. L. H. 1988. *Hidrología para ingenieros*. McGraw-Hill. México 386 p.

- López, C. del LL., F. (ed.) 1994. *Restauración Hidrológico Forestal de cuencas y control de la erosión*. Mundipresna. Madrid. 902 pp.
- López, G. E. M. 1999. *Cambios de uso del suelo y crecimiento urbano en la ciudad de Morelia*. Tesis. Maestría. UMSNH. 134 pp.
- Lørup, J.K., Refsgaard, J.C. and Mazvimavi, D. 1998. *Assesing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical test and hydrological modeling: case studies from Zimbabwe*. Journal of Hydrology 205: 147-163.
- Maidment, D. R. 1993. *GIS and hydrologic modeling*. in: Goodchild, M. F.; B.O. Parks and L T. Steyaert (eds.) *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press. pp.147-167.
- Mäkelä, H. and A. Pekkarinen. 2001. *Estimation of timber volume at the sample plot level by means of image segmentation and Landsat TM imagery*. Remote Sensing of Environment 77 (1):66-75.
- Marsh, W.M. 1997. *Landscape Planning. Environmental Applications*. 3th. Edition. John Wiley and Sons, Inc. U.S.A. 434 pp.
- Martin, M.E., Newman, S.D., Aber, J.D. and R.C. Congalton. 1998. *Determining Forest Species Composition Using High Spectral Resolution Remote Sensing Data*. Remote Sensing of Environment 65 (3) 249-254.
- Matteucci, S.D. y Colma, A. 1982. *Metodología para el estudio de la vegetación*. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Washington, D.C. 168pp.
- McVaugh, R. 1974. Flora Novo-Galiciana. *A descriptive account of vascular plants of western Mexico. Volume 12. Part 1. Number 3. Fagaceae*. The University of Michigan Press. 93 pp.
- McVaugh, R. 1984. Flora Novo-Galiciana. *A descriptive account of vascular plants of western Mexico. Volume 12. Compositae*. The University of Michigan Press. 1157 pp.
- McVaugh, R. 1985. Flora Novo-Galiciana. *A descriptive account of vascular plants of western Mexico. Volume 16. Orchidaceae*. The University of Michigan Press. 363 pp.
- McVaugh, R. 1987. Flora Novo-Galiciana. *A descriptive account of vascular plants of western Mexico. Volume 5. Leguminosae*. The University of Michigan Press. 786 pp.

- McVaugh, R. 1989. *Flora Novo-Galiciana. A descriptive account of vascular plants of western Mexico. Volume 15. Bromeliaceae to Dioscoreaceae.* The University of Michigan Press. 398 pp.
- McVaugh, R. 1990. *Flora Novo-Galiciana. A descriptive account of vascular plants of western Mexico. Volume 14. Gramineae.* The University of Michigan Press. 436 pp.
- Medina , C. y Rodríguez L.S. 1995. *Estudio Florístico de la Cuenca del Río Chiquito de Morelia, Michoacán, México.* Flora del Bajío y Regiones Adyacentes. Fascículo complementario IV. Instituto de ecología A.C. Pátzcuaro, Mich. 71 pp.
- Mendoza, C. M. E. 2002. *Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la cuenca del Lago de Cuitzeo.* Tesis Doctoral. Instituto de Geofísica. UNAM. 188 pp.
- Miranda, F., Hernández-Xolocotzi, E. 1963. *Los tipos de vegetación de México y su clasificación.* Boletín de la Sociedad Botánica de México. 28:29-179.
- Mueller-Dombois, D. & H. Ellenberg. 1974. *Aims and Methods of Vegetation Ecology.* John Wiley & Sons. United States of America. 547pp.
- Muinonen, E., Maltamo, M., Hyppänen, H and V. Vainikainen. 2001. *Forest characteristics estimation using a most similar neighbor approach and image spatial structure information.* Remote Sensing of Environment 78 (3): 223-228.
- Mutchler, C. K. , Murphree, C.E. and K.C. McGregor. 1994. *Laboratory and Field Plots for Erosion Research.* In: Lal, R. (ed.) Soil Erosion Research Methods. Soil and Water Conservation Society. U.S.A.. pp. 11-37.
- Neitsch S.L., Arnold J. G., Kiniry J. R., and J.R. Williams. 2001. *Soil and water assessment tool, theoretical documentation.* Texas Agricultural Experiment Station. Texas. USA. 506 pp.
- Neuman, M. and Starlinger, F. 2001. *The significance of different indices for stand structure and diversity in forest.* Forest Ecology and Management 145:91-106.
- Olaya, F. V. 2002. *Integración de modelos computacionales geomorfológicos, hidrológicos y selvícolas para el desarrollo de soluciones SIG específicos en hidrología forestal de pequeñas y medianas cuencas vertientes españolas.* Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. 188 pp. Más apéndices.
- Olioso, A., Chauki, H., Courault, D. and J.P. Wigneron. 1999. *Estimation of Evapotranspiration and Photosynthesis by Assimilation of Remote*

*Sensing Data into SVAT Models*. Remote Sensing of Environment 68 (3):341-356.

Paegelow, M., Camacho-Olmedo, M.T y Menor-Toribio, J. 2003. *Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje*. revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica. 3: 22-44.

Palacios-Prieto, J. L., G. Bocco, A. Velázquez, J-F. Mas, F. Takaki-Takaki, A. Victoria, L. Luna-González, G. Gómez-Rodríguez, J. López-García, M. Palma, I. Trejo-Vázquez, A. Peralta H., J. Prado-Molina, A. Rodríguez-Aguilar, R. Mayorga-Saucedo y F. González M. 2000. *La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000*. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 43:183-203.

Pennington, T. F. y J. Sarukhán. 1968. *Árboles Tropicales de México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 521 pp.

Pineda, L. R. y Hernández, H. L. (eds.) 2000. *La Microcuenca Santa Catarina, Querétaro: Estudios para su conservación y manejo*. UAQ- SEMARNAP. 147 pp.

Pouliot, D.A., King, D.J., Bell, F.W. and D.G. Pitt. 2002. *Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration*. Remote Sensing of Environment 82 (2-3): 322-334.

Randhir, O.T., O'Connor, R., Penner, R.P. and D.W. Goodwin. 2001. *A watershed-based land prioritization model for water supply protection*. Forest Ecology and Management 143:47-56.

Rodríguez-Iturbe, I. and Valdés, J.B. 1979. *The geomorphologic structure of hydrologic response*. Water Resources Restoration 15 (6): 1409-1420.

Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P.C., Morton, A.J. 1971. *A predictive model of rainfall interception in forest I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine*. Agricultural Meteorology 9: 367-384.

Rzedowski, J. 1978. *La Vegetación de México*. Limusa. México. 432 pp.

Rzedowski, G. C. de, J. Rzedowski. 2001. *Flora fanerogámica del Valle de México*. 2ª. Ed., Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Pátzcuaro, Michoacán. 1406 pp.

Saaty, R.W. 1987. The analytic hierarchy process--what it is and how it is used. Mathematical Modeling 9(3), 161-176.

- Sabol, D.E., Gillespie, A.R., Adams, J.B., Smith, M.O. and C.J. Tucker. 2002. *Structural stage in Pacific Northwest forest estimated using simple mixing models of multispectral images*. Remote Sensing of Environment 80 (1):1-16.
- Schellekens, J., Scatena, F.N., Bruijnzeel, L.A. and Wickel, A.J. 1999. *Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico*. Journal of Hydrology. 225: 168-184.
- Schellekens, J., 2000. *Hydrological processes in a humid tropical rain forest: a combined experimental and modeling approach*. Doctoral Thesis. Vrije Universiteit Amsterdam. 158 pp.
- Scurlock, J.M.O., G.P. Asier and S.T. Gower. 2001. *Worldwide historical estimates of leaf area index, 1932-2000*. Oak Ridge National Laboratory. NASA Reference Number S-87079-F under Interagency Agreement number 2013-P289-A1 with the U.S. Department of Energy. 34 pp.
- Senay, G.B. and R.L. Elliott. 2000. *Combining AVHRR-NDVI and landuse data to describe temporal and spatial dynamics of vegetation*. Forest Ecology and Management 128: 83-91.
- Smajstrala , A. G. and Harrison, D.S. 1981. *Weirs for Open-Channel Flow Measurement*. Document AE-25. Agricultural & Biological Engineering Department. University of Florida. 10 pp.
- Standley, P.C. 1920-1926. *Trees and Shrubs of Mexico*. Vol. 23. Parts 1-5. Smithsonian Press. Washington, D.C. 1721 pp.
- Steinbuck, E. 2002. *The influence of tree morphology on stemflow in a redwood region second-growth forest*. M.Sc. Thesis. Faculty of California State University, Chico. USA. 55 pp.
- St-Onge, B.A. and Cavayas, F. 1997. *Automated Forest Structure Mapping from High Resolution Imagery Based on Directional Semivariogram Estimates*. Remote Sensing of Environment 61 (1):82-95.
- Swank, W.T., J.M. Vose and K.J. Elliot. 2001. *Long term hydrologic and water quality responses following commercial clearcutting of mixed hardwoods on a sothern Apalachian catchment*. Forest Ecology and Management 143: 163-178.
- Thornthwaite, C.W. y J.R. Mather, 1957. *Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and Water Balance*. Publications in Climatology 10(3). Drexel Institute for Technology. Laboratory of Climatology. Centerton, New Jersey.

- Tomppo, E., Nilsson, M., Rosengren, M., Alto, P. and P. Kennedy. 2002. *Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1C WIFS data in estimating large areas tree stem volume and aboveground biomass*. Remote Sensing of Environment. 82 (1): 156-171.
- Torres, R. L. 1994. *Contribución al conocimiento de las plantas vasculares del cerro Patamban, Mpio. de Tangancicuaro y Los Reyes, Mich. Méx.* Tesis Licenciatura. Facultad de Biología UMSNH. 88 pp.
- Townshend J.R.G. 1981. *Terrain Analysis and Remote Sensing*. George Allen & Unwin. London. 232 pp.
- Turner I, B.L., D. Skole, S. Sanderson, G. Fischer, L. Fresco and R. Leemans 1995. *Land-Use and Land-Cover Change (LUCC): Science/Research Plan*. IGBP Report No. 35.
- Turner, D.P., Acker, S.A., Means, J.E. and S.L. Garman. 2000. *Assesing alternative allometric algorithms for estimating leaf area of Douglas-fir trees and stands*. Forest Ecology and Management 126 (2000) 61-76.
- Van Dijk A.I.J.M and Bruijnzeel, L.A., 2001. *Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model 1. Model description*. Journal of Hydrology 247: 230-238.
- Van Dijk A.I.J.M 2002. *Water and sediment dynamics in bench-terraced agricultural steepplands in west Java, Indonesia*. Ph.D. Thesis. Vrije Universiteit Amsterdam.
- Van Wijk, M.T, Dekker, S.C., Bouten, W., Kohsiek, W. and Mohren, G.M.J. 2001. *Simulation of carbon and water budgets of a Douglas-fir forest*. Forest Ecology and Management 145: 229-241.
- Velázquez, A. y G. Bocco. 1994. *Modelling conservation alternatives with ILWIS: a case study of the volcano rabbit*. ITC Journal 3:197–204.
- Wasseige, C., and P. Defourny. 2002. *Retrieval of tropical forest structure characteristics from bi-directional reflectance of SPOT images*. Remote Sensing of Environment 83 (3): 362-375.
- Weng, Q. 2002. *Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modeling*. Jorunal of Environmental Management 64: 273-284.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. Agricultural Handbbook 537. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. 58 p.

- Wulder, M., Niemann, K.O. and D.G. Goodenough. 2000. *Local Maximum Filtering for Extraction of Tree Locations and Basal Area from High Spatial Resolution Imagery*. Remote Sensing of Environment 73 (1):103-114.
- Zeng, N. Shuttleworth, J.W. y J.H.C. Gash. 2000. *Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part I. Point analysis*. Journal of Hydrology 228:228-241.
- Zhang, L., W.R. Dawes and G.R. Walter 1999. *Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance*. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Technical report 99/12. Canberra, Australia. 35 pp.
- Zhu, J.J., Matsuzaki, T. and Y. Gonda. 2003. *Optical stratification porosity as a measure of vertical canopy structure in a Japanese coastal forest*. Forest Ecology and Management 173 (2003) 89-104.
- Zirlewagen, D. and Wilper, V.K. 2001. *Modeling water and ion fluxes in a highly structured, mixed-species stand*. Forest Ecology and Management 143:27-37.



# APENDICES

# 1

## ECUACIONES GENERALES Y ASPECTOS METODOLÓGICOS

**El Cociente de circularidad ( $R_c$ ).** Es una función de la superficie y el perímetro del área de captación (AC) (cuena de drenaje pequeña o subcuena *sensu* “catchment” de Hewlett 1982 o unidad de escurrimiento *sensu* Pineda y Hernández 2000) en relación al área de un círculo con el mismo perímetro. Supone que mientras más cercano sea a la unidad, la semejanza con un círculo será mayor y la concentración de escurrimientos superficiales será mas sencilla que en formas alargadas o asimétricas. Así:

$$R_c = \frac{A}{A_c}$$

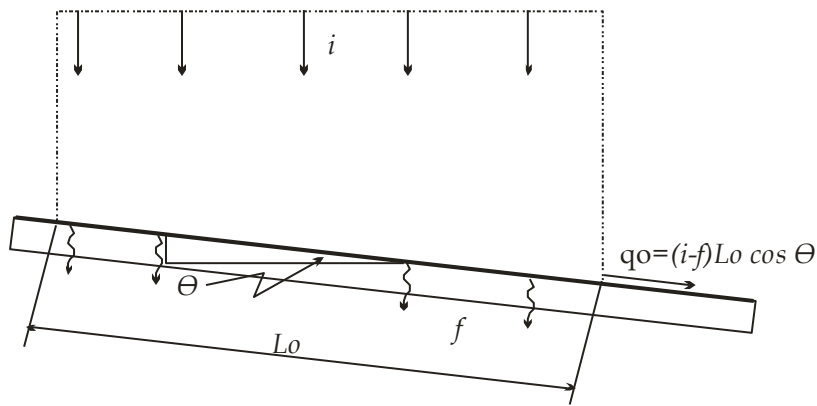
donde:

$R_c$  = cociente de circularidad

$A$  = superficie del área de captación.

$A_c$  = área de un círculo con el mismo perímetro que el área de captación

**La Pendiente.** Es considerado uno de los principales factores que afectan la RH (Rodríguez-Iturbe & Valdés 1979, Marsh 1997 y Neitsch et al. 2001), ya que antes de concentrarse en canales reconocibles en el terreno, el flujo superficial es una lámina delgada que aparece en la parte superior de las laderas. El gasto unitario (**qo**) a lo largo de un plano uniforme de longitud  $L_o$  y de ancho unitario, en el cual la lluvia cae con una intensidad  $i$  y se presenta una infiltración a una tasa  $f$ , puede calcularse como se esquematiza en la Figura (Chow et al. 1994).



Flujo en un plano uniforme sometido a lluvia (Tomado de Chow et al. 1994).

**La Densidad de drenaje (Dd).** Es la relación entre la longitud total de corrientes y la superficie de un AC. Cuencas densamente drenadas pueden mostrar RH más rápidas que cuencas de características similares sin una red de drenaje desarrollada. De acuerdo con Chow et al. (1994) la Dd es un parámetro muy útil para hacer análisis de similitud geométrica entre cuencas y se calcula mediante la ecuación:

$$D_d = \frac{L}{A}$$

donde:

$D_d$ = Densidad de drenaje.

$L$ = Longitud total de canales en el área de captación (km)

$A$ = Superficie del área de captación ( $\text{km}^2$ )

**El tiempo de concentración ( $t_c$ ).** Representa el tiempo para el cual toda la cuenca contribuye al flujo en su salida, por lo que el escurrimiento alcanza su caudal pico o máximo ante un evento. De las diversas ecuaciones desarrolladas, el método California Culverts Practice (citado por Chow et al 1994) fue diseñado para cuencas montañosas pequeñas de los estados unidos y establece que:

$$t_c = 60 \left( \frac{11.9L^3}{H} \right)^{0.385}$$

donde:

$t_c$  = tiempo de concentración en minutos

$L$  = longitud de la corriente de agua más larga en millas.

$H$  = diferencia de nivel entre el parteaguas y la salida en pies.

**Las ecuaciones más empleadas en México para la estimación del tiempo de concentración.**

### 1.- Fórmula de Kirpich

$$t_c = 0.0003245 \left[ \frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.77}$$

donde:

$t_c$ , Tiempo de concentración en horas.

$L$ , Longitud del cauce principal en metros

$S$ , Pendiente media del cauce principal (h/L)

### 2.- Fórmula de Rowe

$$t_c = \left[ (0.87 L^3) / D \right]^{0.385}$$

donde:

$t_c$ , Tiempo de concentración en horas.

$L$ , Longitud del cauce principal en kilómetros.

$D$ , Desnivel total del cauce principal en metros

### 3.- Fórmula del Servicio de Conservación de Suelos de EU (SCS)

$$t_c = \frac{L^{1.15}}{3085D^{0.38}}$$

donde:

$t_c$ , Tiempo de concentración en horas.

$L$  Longitud del cauce en kilómetros.

*D* Desnivel total del cauce en metros.

**Estimación de escurrimiento.** El Método SCS (1972) parte de la determinación del exceso de precipitación:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{PG + 0.8S}$$

donde:

$P_e$ = Lámina de exceso de precipitación (escurrimiento directo en pulgadas)

$PG$ = Lámina de precipitación del evento (en pulgadas).

$S$ = Lámina de retención potencial máxima (en pulgadas)

El parámetro  $S$  requiere la selección y cálculo de la denominada curva numérica (CN) dependiendo de las condiciones de humedad antecedentes en el suelo. El grupo III corresponde a la conversión para condiciones de lluvia antecedente total de 5 días mayor de 2.1 pulgadas, situación en la que generalmente se produce la mayor escurrimiento ya que el suelo se satura más rápidamente y los flujos laterales que contribuyen al caudal son tanto subsuperficiales como Hortonianos. Su cálculo se establece como:

$$CN_{(III)} = 23 CN_{(II)} / (10 + 0.13CN_{(II)})$$

donde  $CN_{(II)}$  corresponde al valor de CN en condiciones normales de lluvia antecedente total en 5 días, es decir entre 1.4 y 2.1 pulgadas.

$$S = (1,000/CN_{(III)}) - 10$$

Como este método no considera el tiempo de descargas pico, puede ser también empleado el método deductivo de Hidrograma Sintético Adimensional propuesto

también por el SCS para estimar el valor de escurrimiento directo al pico de la descarga. Se tiene que:

$$q_p = CA / T_p$$

donde:

$q_p$  = escurrimiento directo en  $m^3/s \times cm$  de Pe

C = 2.08 (constante adimensional para el sistema decimal)

A = superficie en  $km^2$

$T_p$  = Tiempo pico de descarga

$$= t_r/2 + t_p$$

$t_r$  = tiempo de duración de la lluvia efectiva (horas)

$t_p$  = tiempo de retardo (hrs.) aprox.  $0.6t_c$

$t_c$  = tiempo de concentración (hrs.) =  $(11.9L^3/H)^{0.385}$

El cálculo del parámetro S requirió de la selección y cálculo de la denominada curva numérica (CN) dependiendo de las condiciones de humedad antecedentes en el suelo. Para el caso de eventos ordinarios fue seleccionado en este caso el grupo III correspondiente a la conversión para condiciones de lluvia antecedente total de 5 días (mayor de 2.1 pulgadas  $CN_{(III)} = 23 CN_{(II)} / 10 + 0.13CN_{(II)}$ , donde  $CN_{(II)}$  corresponde al valor de CN (= 77) en condiciones normales de lluvia antecedente total en 5 días, es decir entre 1.4 y 2.1 pulgadas.

$$S = (1,000/CN_{(III)}) - 10$$

Se consideró una CN = 77 correspondiente al suelo del grupo D (suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y uso del suelo tipo bosque con cubierta buena). Como  $CN_{(II)} = 77$ ,  $CN_{(III)} = 88.5$  y por tanto:

$$S = (1,000/88.5) - 10$$

$$= 1.29 \text{ pu}$$

De ahí que la lámina de exceso de precipitación (Pe) de tormentas de 5, 10, 15, y 20 mm en 1 hr representan Pe como las que se señalan en el cuadro siguiente:

pp (mm)	Pe (cm) (Condición III)	$Q_{AC18}$ (m <sup>3</sup> /s) considerando qp y Pe	$Q_{AC30}$ (m <sup>3</sup> /s) considerando qp y Pe
5	0.0081	0.00817	0.0054
10	0.0318	0.03208	0.0213
15	0.1706	0.17211	0.1143
20	0.3872	0.39062	0.2594

Aunque este método no considera el tiempo de descargas pico, la lámina resultante en cada una de las AC experimentales de 25.9 y 16.9 ha respectivamente (0.259 km<sup>2</sup> y 0.169 km<sup>2</sup>), correspondería a volúmenes de escorrentías que no consideran el lapso en que la descarga del evento transcurre, alcanza un pico y finalmente decrece posteriormente al evento.

Dado lo anterior y siguiendo el método deductivo de Hidrograma Sintético Adimensional propuesto también por el SCS para estimar el valor de escorrentía directa al pico de la descarga, se tiene :

$$qp = CA / Tp$$

donde:

qp=escorrentía directa en m<sup>3</sup>/s x cm de Pe

C= 2.08 (constante adimensional para el sistema decimal)

A= superficie en km<sup>2</sup>

Tp= Tiempo pico de descarga

$$= tr/2 + tp$$

tr= tiempo de duración de la lluvia efectiva (1 hora)

tp= tiempo de retardo( hrs.) aprox. 0.6tc

$$tc = \text{tiempo de concentración (hrs.)} = (11.9L^3/H)^{0.385}$$

L= longitud de la corriente de agua más larga en millas.

H= diferencia de nivel entre el parteaguas y la salida en pies.

(tc AC18=0.056 h; tc AC30= 0.043 h)

$$\begin{aligned}
tp_{AC18} &= 0.6 \times 0.056 & tp_{AC30} &= 0.6 \times 0.043 \\
&= 0.034 \text{ h} & &= 0.025 \text{ h} \\
Tp_{AC18} &= 1/2 + 0.034 & Tp_{AC30} &= 1/2 + 0.025 \\
&= 0.5034 & &= 0.5025 \\
qp_{AC18} &= 2.08 \times 0.259 / 0.5034 & y & qp_{AC30} = 2.08 \times 0.169 / 0.5025 \\
&= \mathbf{1.07 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{cm de Pe}} & &= \mathbf{0.7 \text{ m}^3/\text{s} \times \text{cm de Pe}}
\end{aligned}$$

De este modo, los gastos esperados al pico de tormentas de 5, 10, 15 y 20 mm de 1 hr de duración, en las AC 18 y 30, considerando tanto el exceso de precipitación como la escorrentía por cm de dicho exceso de precipitación se presentan en el cuadro anterior.

### Modelos de gasto de vertedores rectangulares sin contracciones laterales

Autor(es) de la Ecuación	Expresión	Límites de aplicación
Francis (1852)	$Q = 1.84 (H + h_o)^{3/2} - h_o^{3/2}$ .....(24)	$0.18m \leq H \leq 0.5m,$ $2.40m \leq L \leq 3.0m$ $0.6 \leq p \leq 1.5m$
Ftely-Stearns (1912)	$Q = 1.83L (H + 1.5h_o)^{3/2} + 0.00065L$ .....(25)	$0.24m \leq H \leq 0.50m, 1.50 \leq L \leq 5.80$ $0.96m \leq p \leq 2m, v_o \leq 0.30m/s$
Rehbock (1912)	$Q = 2.952CLH^{3/2}$ .....(26) $C = (0.6035 + 0.0813H/p + 0.00009/p)(1 + 0.0011/H)^{3/2}$	$0.03 \leq H \leq 0.60m, 0.30m \leq L$ $0.10m \leq p$
King (1918)	$Q = 1.78LH^{1.47} (1 + 0.56 H^2/(p+H)^2)$ .....(27)	
SSIA (1924)	$Q = 2.952CLH^{3/2}$ .....(28) $C = (0.615 + 0.615/(1000h + 1.6))(1 + 0.5(H/d)^2)$	$0.025m \leq H \leq 0.80m$ $0.30 \leq p$ $H/p \leq 1$
SBIM s.f.	$Q = 2.952CLH^{3/2}$ ..... (29) $C = 0.4106(1 + 1.8/1000H)(1 + 0.55(H/H+p)^2)$	$0.5m < L$ $0.1m < H < 0.8m$ $H \leq p, 0.30m \leq p$
Smajstrala & Harrison (1981)	$Q = 1495H^{3/2}(L - 0.2H)$ ..... (30) Ly H en pies; Q en galones/min	

Donde: Q= Gasto (m<sup>3</sup>/s); H= Altura de la columna de agua en el estanque (m); h<sub>o</sub>= Altura al nivel del flujo base (m); p= Profundidad del estanque nivelado (m); C= Constante adimensional y d=Distancia del vertedor al punto de medición de la altura del nivel de agua en el estanque.



## Muestreo a la vegetación

La adecuación de la técnica mencionada permite la estimación rápida de distintos atributos de la vegetación. Fueron muestreados los estratos arbóreo y arbustivo localizando puntos a una distancia uniforme de 25 m hacia el este, sobre un transecto ubicado aleatoriamente en diferentes rodales delineados en gabinete. Ante eventuales dificultades de georeferenciación mediante GPS de los sitios de muestreo ya fuese por nubosidad o por densidad de cobertura vegetal, fue suficiente el desplazamiento a claros del bosque donde se pudo recibir señal en el dispositivo para ubicar la trayectoria seguida y asignar coordenadas aproximadas.

Todos los individuos de consistencia leñosa mayores de 4 m y/o d.a.p. igual o mayor a 5 cm fueron considerados como árboles. Los individuos vivos de consistencia leñosa o subfruticosa con d.a.p. menor a 5 cm se incluyeron en los muestreos como arbustos. Se midieron a los individuos en su distancia al centro del cuadrante con cintas métricas o dispositivo electrónico. Fue obtenida la altura total y la altura a la 1ª rama de los individuos, ya sea mediante estadales de 2 m graduados cada 5 cm (cuando su altura lo permitía) o mediante pistola haga (clisímetro).

Se registraron además el promedio de 3 a 4 medidas del radio de proyección de la copa. Diámetro a la altura del pecho (d.a.p.) y diámetro a la altura de la base (d.a.b.) fueron medidas directamente con una cinta métrica.

**Porcentaje de Similitud.** (Sokal y Michener 1958 citados por Matteucci y Colman 1982):

$$PS_{a,b} = 200 \left[ \frac{\sum \min(x_{i,a})}{\sum (x_{i,a} + x_{j,b})} \right]$$

Donde:

$PS_{a,b}$  = Porcentaje de similitud entre las áreas de captación a y b

x<sub>ia</sub> = Valor del parámetro i del área de captación a  
 x<sub>jb</sub> = Valor del parámetro j del área de captación b.

FORMATO PARA EL REGISTRO DE LA INFORMACIÓN EN CAMPO DEL MUESTREO A LA VEGETACIÓN  
 EN LAS AC 18 Y 30

AC No. 18

Fecha: 22 de

ARBOLES							ARBUSTOS						
pendiente promedio: 50%							a partir de foto #:						
ESPECIE	d	h	h1	r	dap	dab	ESPECIE	d	h	h1	r	dap	dab
Alnus	4.1	8.8	6.2	4.5	1.2	1.5	Salix	1.7	2.4	0.8	0.6	-	0.05
Abies	5.67	7.5	7.0	5.27	1.07	1.4	Cestrum	1.29	5.4	3.2	1.0	-	0.01
Symphoricarpos	3.36	4.5	6.9	1.87	0.5	1.0	Eupatorium	3.9	8.2	1.8	1.1	-	0.02
Symphoricarpos	3.95	11	7	2.2	0.9	1.5	Senecio	1.18	1.67	3.7	2.3	-	0.02
pendiente promedio: 50%							a partir de foto #:						
Abies	7.26	26	13	5.7	0.4	0.77	Quercus laevis	1.1	1.7	0.4	1.5	0.05	0.03
Styrax	10.63	7	6.8	1.9	0.8	2.6	Rumex	1.76	2.67	1.8	0.6	0.01	0.02
Abies	4.41	31	1.30	1.37	0.91	1.26		1.25	3.81	2.15	4.2	0.01	0.03
Abies	5.58	7	3.2	2.0	0.9	1.4	Senecio	1.51	3.2	1.17	4	0.02	0.03
pendiente promedio: 50%							a partir de foto #:						
Alnus	6.77	3.7	6	4.15	0.75	1.2	Eupatorium	2.7	6	1.9	2.55	0.4	0.9
Eupatorium	1.75	6	1.72	2.25	0.7	1.1	Senecio	1.48	3.2	2	1.10	0.2	0.3
Eupatorium	2.2	6	2.08	1.75	0.6	1	Senecio	1.14	3.74	2.44	6	1.02	0.5
Styrax	7.75	6.5	3.76	2	0.8	1.5	Salix	1.12	1.07	5.2	0.8	-	0.01
pendiente promedio: 52%							a partir de foto #:						
Alnus	7.47	2.1	7	3.5	0.8	0.44	Senecio	1.21	2.57	1.97	3.1	0.02	0.3
Styrax	5.19	5.55	0.7	1.0	0.8	2.2	Salix	0.7	0.4	3.7	0.2	-	0.02
Berberis	1.8	14	2.05	4	0.4	2	Senecio	2.7	1.39	4.6	1.5	-	0.02
Abies	4.73	9	2.4	1.2	0.05	0.98	Senecio	0.72	0.73	2.0	1.0	-	0.01
pendiente promedio: 69%							a partir de foto #:						
Styrax	1.77	6.5	2.22	2.2	0.08	1.8	Salix laevis	4.7	9.6	2	0.05	-	0.02
Styrax	4.6	5.6	2.1	2.7	0.8	1.6	Symphoricarpos	0.7	4.76	6.2	3.7	0.3	0.7
Alnus	7.77	14	0	7.7	3.7	7.8	Salix laevis	4.1	1.88	3.1	1.0	-	0.01
Styrax	7.75	12	2.75		1.17	3.1	Alnus	1.54	1.77	1.4	1.7	-	0.01
pendiente promedio: 65%							a partir de foto #:						
O. laevis	1.83	2.4	5	10.6	0.77	1.5	Dicentra	0.69	2.16	1.1	1.0	0.01	0.02
Ternstroemia	4.71	5.5	2.2	2.95	1.6	2.3	Ternstroemia	0.79	1.32	2.5	5.8	-	0.07
Abies	3.28	3.0	0.5	5	1.02	1.34	Dicentra	0.36	1.48	2.8	8	-	0.05
Styrax	4.67	7	1.06	2.2	0.6	1.8	Ternstroemia	0.85	0.7	1.2	1.1	-	0.04
pendiente promedio:							a partir de foto #:						

## Sistema de clasificación de los tipos de vegetación

El sistema de clasificación de tipos de vegetación aquí presentado se define a partir de 5 criterios, los primeros dos de izquierda a derecha en el cuadro 4.7 encabezados por las columnas 2 y 3 definen el nivel de **formación** en el sentido de las *Hauptformen* (*sensu* Humboldt y Grisebach 1805 citados por Margalef 1980) y que denotan grandes agrupaciones vegetales reconocibles a nivel mundial. En este primer nivel, definido por la fisonomía (visión de conjunto de las principales formas de vida dominantes de la comunidad) y su afinidad climática se reconocen 5 categorías de comunidades. Un segundo nivel (columna 4) que se denomina **subformación**, es definido principalmente por la función o fenología dominante del follaje y en él se reconocen 7 categorías de comunidades.

El tercer nivel (columna 5) es denominado **serie de asociaciones**, contiene 8 categorías de comunidades y corresponden aproximadamente con distintas propuesta de clasificación de los tipos de vegetación de México, mismas con las que se hace una equivalencia en el extremo derecho del mismo cuadro 4.6.

Finalmente, la condición de cobertura expresada conforme los criterios de apreciación tanto en fotografía aérea, como de recorrido en campo así como de estimaciones cuantitativas de densidad de individuos por hectárea, así como la composición de la o las 2 especies arbóreas con mayor valor de importancia o por su dominancia fisonómica, constituyen la discriminación jerárquica más detallada de las comunidades en el área de estudio hasta un nivel denominado **asociación** y de las cuales se reconocen en el presente trabajo 17 categorías.

Como **Bosque natural** se comprende a las comunidades dominadas fisonómicamente por individuos arbóreos, de tallo principal distinguible y altura hasta el límite de su copa, mayor de 4m, sin grandes expresiones de intervención de aprovechamiento por los habitantes. **Bosque antropizado**: Como la anterior,

pero con una identificable intervención antropogénica mediante prácticas relacionadas con la producción o el aprovechamiento agrícola, silvícola o pecuario.

**Matorral antropizado:** Comunidad dominada en su fisonomía por individuos arbustivos, sin tallo principal distinguible (surgen varios cerca del nivel del suelo) y la altura hasta el límite de su copa es inferior a 4 m. **Herbazal antropizado:** La dominancia fisonómica es de individuos de consistencia herbácea a subfruticosa y con una marcada composición y estructura que denota intervención antropogénica mediante prácticas relacionadas con la producción o el aprovechamiento pecuario.

La afinidad climática **templada** se distingue por el régimen de temperatura (de 5 a 18 ° C de temperatura media mensual) que corresponde aproximadamente con los climas de tipo C en la clasificación de Köppen y en las modificaciones al sistema de dicho autor incorporadas para México por García. En el caso de las comunidades de afinidad **tropical**, estas corresponden principalmente a climas de tipo A de los autores mencionados y que se define por un régimen de temperatura media mensual mayor de 18° C. Las comunidades **euriclimáticas** se presentan tanto en climas afines a los de tipo C como a los de tipo A de la clasificación de Köppen.

Respecto a la fenología del follaje, ésta identifica como **Perenne** a comunidades cuyos individuos dominantes fisonómicos conservan su follaje durante la época seca del año; **Subperenne** aquellas cuyos individuos dominantes en al menos un 70% conservan su follaje durante la época seca del año y **Caduco** a las comunidades en que la mayoría de los individuos dominantes pierden su follaje durante la época seca del año.

Mediante el criterio de forma dominante de hoja se pueden distinguir comunidades de **Linearifolios** cuando el follaje de los individuos dominantes fisonómicos tienen las hojas lineares como el abeto u oyamel, **Latifolios:** principalmente con hojas anchas; **Acículi-Latifolios** cuando los individuos muestran tanto hojas aciculares

como de hojas latifoliadas o anchas, esta condición incluye la eventual dominancia de los primeros o los segundos; **Heterófilos** si no existen individuos dominantes con una marcada caracterización de la comunidad por la anchura o dimensiones de sus hojas (las excepciones se dan en algunos manchones de matorral de condiciones templadas en que domina *Baccharis*) y finalmente **Angustifolios** si los individuos dominantes muestran hojas largas y angostas (graminoides).

Los criterios de cobertura y uso distinguen una condición **dispersa** si la comunidad cubre del 5 al 50% del suelo, en estos casos la densidad de árboles es inferior a 100 individuos por hectárea. Una cobertura **abierta** corresponde a comunidades que cubren entre el 50 y el 80 % del suelo e incluye densidades del estrato arbóreo de hasta 600 individuos por hectárea y una cobertura **compacta** se distingue cuando la comunidad cubre más del 80% del suelo y la densidad de individuos es mayor a 700 individuos. La categoría **heterogénea** corresponde a comunidades que cubren diversos porcentajes del suelo. El criterio de altura se manejó como en la propuesta de González-Medrano (2003) considerando **Bajo**, **Mediano** y **Alto** –respectivamente- los intervalos de 4 a 15; 15 a 30 y >30 m en el caso de árboles; <1, 1 a 2 y 2 a 4 m en el caso de arbustos y mediano de 0.5 a 2 m y bajo <0.5 m en el caso de hierbas.

Por último, los usos identificados en la el área de estudio fueron el habitacional, el agrícola, el silvícola y el pastoril de los cuales es posible cartografiar los primeros 3 (considerando el tercero como las comunidades de aciculi-latifolios y lati-aciculifolios), mientras que el último es una actividad espacialmente difícil de cartografiar en su intensidad en la mayoría de las categorías señaladas.

A nivel de series de asociaciones (tipos de vegetación) se hicieron de este modo comparables las categorías cartografiadas por INEGI (conforme a la carta publicada en 1983), la interpretación de la ortofoto digital (correspondiente a 1994) y el resultado de la clasificación supervisada de la subescena multiespectral Landsat (del año 2003), lo que permitió una evaluación multitemporal del

desarrollo de las comunidades a nivel de series de asociaciones, principalmente en términos de superficie ocupada por estas dentro del área de estudio.

La caracterización de las comunidades a nivel de series de asociaciones incorporando los criterios estructurales de cobertura y altura se pudo realizar solamente con la interpretación de la ortofoto digital, en tanto que la descripción de las comunidades a nivel de asociaciones se realizó solamente para las AC experimentales.

# 2

## PARÁMETROS FÍSICOS DE LAS 131 ÁREAS DE CAPTACIÓN

AC	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Altitud mínima (m)	Altitud máxima (m)	Dif. altitudinal H (m)	Altitud promed. (m)	STD Altitud (m)	Pendiente máxima (grados)	Pendiente promedio (grados)	STD Pendiente (grados)	Rc	L <sub>max</sub> (km)	Densidad de drenaje		Longitud total de fallas (m)	Longitud total de fracturas (km)	AC de 1er orden
													(km/km <sup>2</sup> )	tc (min)			
1	0.16	3.03	2209.94	2440.00	230.06	2354.77	49.18	29.72	12.49	6.62	0.21	0.83	5.33	5.66	0.00	0.00	1
2	0.47	3.75	2200.00	2500.00	300.00	2362.87	65.77	47.65	16.99	7.76	0.42	1.05	2.22	6.59	0.00	213.76	1
3	0.48	3.81	2220.00	2500.00	280.00	2370.51	58.56	46.13	18.24	9.54	0.41	1.15	2.43	7.44	0.00	231.20	1
4	0.17	3.14	2160.11	2500.00	339.89	2377.43	74.69	55.04	21.21	9.89	0.22	0.92	5.37	5.45	0.00	670.57	1
5	0.34	3.74	2062.80	2520.00	457.20	2340.81	102.05	51.21	22.68	8.70	0.31	0.88	2.57	4.66	0.00	0.00	1
6	0.56	8.26	2100.00	2520.00	420.00	2243.63	71.10	65.21	26.62	12.65	0.10	2.08	3.71	2.25	0.00	460.87	0
7	0.22	3.27	2145.52	2520.00	374.48	2406.39	78.29	66.19	20.36	8.93	0.26	0.75	3.44	4.15	0.00	15.13	1
8	0.70	5.32	2262.22	2740.00	477.78	2491.47	104.40	63.18	23.96	10.36	0.31	1.64	2.34	9.40	0.00	1502.54	1
9	0.64	5.04	2048.21	2478.87	430.66	2311.51	80.81	64.50	20.90	9.82	0.31	1.13	1.78	4.38	0.00	0.00	1
10	0.17	2.69	2080.00	2445.85	365.85	2270.52	80.26	44.29	21.65	8.06	0.30	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0
11	0.21	3.02	2200.00	2405.82	205.82	2287.78	50.04	63.27	20.68	11.52	0.29	0.73	3.46	1.67	0.00	319.43	0
12	0.46	3.86	2311.53	2740.00	428.47	2553.12	107.50	67.61	27.43	10.17	0.39	1.14	2.45	6.39	0.00	1.21	1
13	0.27	3.22	2072.23	2440.00	367.77	2327.02	81.20	62.88	19.34	11.20	0.32	0.76	2.83	4.18	0.00	0.00	1
14	0.47	4.55	1940.00	2340.00	400.00	2144.00	77.01	68.82	31.32	12.90	0.29	1.12	2.37	2.52	0.00	368.83	0
15	0.14	2.46	2280.00	2554.44	274.44	2376.96	63.82	52.39	23.52	10.41	0.29	0.38	2.70	0.85	0.00	134.25	0
16	0.23	2.67	2260.00	2440.00	180.00	2339.16	38.32	64.11	21.24	11.31	0.41	0.85	3.64	2.66	0.00	0.00	0
17	0.53	5.04	1777.53	2420.00	642.47	2133.94	145.21	61.62	27.34	11.17	0.26	1.32	2.51	6.50	1159.99	0.00	1
18	0.26	3.11	2600.00	2900.00	300.00	2763.39	55.30	51.82	17.92	9.13	0.34	1.29	4.97	3.43	0.00	0.00	1
19	0.44	4.28	2418.11	2800.00	381.89	2602.82	88.23	65.45	30.38	11.56	0.30	1.23	2.80	2.15	0.00	0.87	0
20	0.38	3.99	1800.00	2417.93	617.93	2088.34	155.61	74.86	28.49	12.20	0.30	0.69	1.80	3.10	0.00	27.91	0
21	0.24	3.34	1880.00	2401.14	521.14	2101.55	152.27	62.15	29.93	12.34	0.27	0.77	3.24	2.30	0.00	297.75	0
22	0.18	3.79	1920.00	2381.75	461.75	2076.56	111.06	68.58	30.86	13.41	0.15	0.37	2.11	1.29	0.00	315.66	0
23	0.24	2.96	2300.00	2589.94	289.94	2406.24	48.40	67.68	17.08	11.98	0.35	0.62	2.54	3.64	0.00	0.00	1
24	0.32	3.65	2320.00	2652.10	332.10	2430.92	67.96	58.88	25.31	12.91	0.30	0.91	2.84	4.70	0.00	772.27	0
25	0.66	5.84	2195.83	2844.53	648.71	2516.76	142.45	66.84	27.50	12.26	0.24	1.93	2.92	9.81	0.00	0.00	1
26	0.20	2.93	2320.00	2640.00	320.00	2458.82	80.86	64.92	21.76	12.78	0.30	0.61	3.04	1.64	0.00	0.00	1
27	0.17	2.39	2100.00	2380.00	280.00	2225.49	59.81	57.88	27.53	10.24	0.37	0.45	2.69	2.57	0.00	0.00	0
28	0.53	4.76	1773.78	2320.00	546.22	2069.24	91.96	53.89	20.57	10.37	0.30	1.41	2.64	7.42	0.00	0.00	1
29	0.23	3.24	1842.59	2320.00	477.41	2023.33	127.17	71.75	31.54	12.39	0.27	0.32	1.42	1.44	0.00	331.57	0
30	0.17	2.40	2572.44	2900.00	327.56	2765.44	72.57	54.29	20.80	8.67	0.37	0.94	5.57	2.70	0.00	0.00	1
31	0.23	2.78	2120.00	2460.00	340.00	2276.59	69.41	54.07	23.72	8.53	0.37	0.62	2.75	2.77	0.00	0.00	0
32	0.13	2.71	2360.00	2600.00	240.00	2467.95	57.01	39.34	17.30	7.78	0.22	0.62	4.83	3.97	0.00	0.00	0
33	1.25	7.10	2201.93	3040.00	838.07	2592.54	193.98	68.48	31.51	10.90	0.31	3.38	2.70	10.76	0.00	0.00	1

AC	Área (km²)	Perímetro (km)	Altitud mínima (m)	Altitud máxima (m)	Dif. altitudinal H (m)	Altitud promed. (m)	STD Altitud (m)	Pendiente máxima (grados)	Pendiente promedio (grados)	STD Pendiente (grados)	Rc	Densidad de drenaje			Longitud total de fallas (m)	Longitud total de fracturas (km)	AC de 1er orden
												L <sub>max</sub> (km)	(km/km²)	tc (min)			
34	0.18	2.94	1774.24	2246.26	472.02	1958.74	86.01	67.71	24.61	15.58	0.26	0.14	0.76	0.43	0.00	0.00	0
35	0.50	4.89	2540.00	2980.00	440.00	2838.18	69.91	59.06	17.67	9.99	0.26	1.28	2.58	7.01	0.00	0.00	1
36	0.39	4.85	1583.36	2080.00	496.64	1862.01	149.83	51.33	17.96	8.31	0.21	1.56	3.96	4.98	0.00	0.00	1
37	0.72	5.00	1900.00	2479.15	579.15	2201.57	118.66	69.63	30.52	11.19	0.36	1.20	1.67	6.24	0.00	0.00	0
38	0.28	4.27	2420.00	2811.02	391.02	2562.10	90.40	59.15	25.79	12.90	0.20	1.06	3.73	1.83	0.00	538.02	0
39	0.22	3.69	1700.00	2161.36	461.36	1869.52	89.93	60.12	21.35	10.02	0.21	0.00	0.00	0.01	213.03	26.54	0
40	0.37	4.28	2420.00	3000.00	580.00	2700.57	130.43	65.76	21.16	13.25	0.25	0.04	0.11	0.11	0.00	0.00	1
41	0.62	5.11	2420.00	3040.00	620.00	2733.78	138.91	64.50	29.29	12.55	0.30	1.61	2.63	8.54	0.00	0.00	1
42	0.75	5.00	2480.00	2913.85	433.85	2690.79	104.80	61.81	29.40	10.89	0.38	1.61	2.15	3.14	0.00	885.79	0
43	0.66	6.85	1700.00	2180.00	480.00	1863.28	89.34	67.16	27.97	13.77	0.18	2.11	3.21	2.89	914.96	1045.65	0
44	0.29	3.30	1871.12	2400.00	528.88	2164.63	138.19	69.16	31.40	10.87	0.33	0.01	0.03	0.02	0.00	7.69	1
45	0.24	3.44	1700.00	2040.00	340.00	1935.08	75.46	49.34	16.24	7.31	0.26	0.70	2.89	3.38	0.00	0.00	1
46	0.33	4.01	1640.00	1980.18	340.18	1791.31	87.70	52.52	20.47	8.71	0.25	1.59	4.90	4.27	283.84	2.72	0
47	0.13	2.43	1825.05	2256.03	430.98	2024.49	117.25	57.71	32.68	9.39	0.28	0.67	5.18	3.40	0.00	0.00	1
48	0.18	4.00	2480.00	2773.86	293.86	2639.27	65.33	59.18	17.06	9.66	0.14	1.25	7.05	3.47	0.00	0.00	0
49	0.26	2.69	2642.40	2980.00	337.61	2833.61	73.86	63.30	28.57	10.51	0.44	0.67	2.64	4.04	0.00	0.00	1
50	0.17	3.46	2526.55	3000.00	473.45	2726.10	114.20	64.93	18.82	11.45	0.18	0.24	1.42	1.03	0.00	0.00	0
51	0.17	2.41	1700.00	2020.00	320.00	1889.02	74.78	56.66	22.57	9.86	0.37	0.53	3.09	2.52	0.00	0.00	1
52	0.56	4.55	2200.00	2646.38	446.38	2409.91	95.15	66.45	26.59	10.66	0.34	1.80	3.23	2.95	0.00	0.00	0
53	0.35	4.32	1500.00	2020.00	520.00	1713.92	112.50	62.46	25.29	9.80	0.23	1.12	3.24	6.21	0.00	0.00	1
54	0.19	2.97	1796.00	2171.93	375.93	1944.47	80.80	60.71	32.13	11.43	0.27	0.48	2.48	1.64	225.53	0.00	0
55	0.20	2.88	2578.69	2900.00	321.31	2736.00	93.21	67.50	25.89	13.87	0.30	0.40	1.99	2.00	0.00	0.00	0
56	0.22	2.64	2200.00	2520.00	320.00	2366.56	59.82	66.64	21.37	12.27	0.39	0.63	2.92	3.64	0.00	0.00	1
57	0.01	0.73	2200.00	2303.56	103.56	2262.93	21.46	28.01	20.45	5.39	0.17	0.07	9.40	0.27	0.00	0.00	0
58	0.15	3.91	2598.58	2940.00	341.42	2769.38	74.97	60.08	20.50	11.88	0.12	0.31	2.13	2.50	0.00	0.00	0
59	0.45	3.64	2660.00	3010.51	350.51	2834.24	61.84	58.65	20.73	8.02	0.42	1.21	2.71	4.50	0.00	822.26	1
60	0.32	3.64	2611.13	2985.93	374.80	2789.49	88.79	64.29	20.32	13.45	0.31	0.75	2.32	4.29	0.00	0.00	1
61	0.19	2.70	1876.03	2400.00	523.97	2173.50	130.90	59.48	29.62	9.59	0.33	0.63	3.29	3.40	0.00	0.00	1
62	0.29	3.48	1560.00	1900.00	340.00	1710.05	76.65	57.96	23.58	9.96	0.31	0.60	2.04	2.83	0.00	0.00	0
63	0.41	5.05	1580.00	1917.76	337.76	1718.84	79.65	60.10	25.62	12.83	0.20	1.17	2.83	3.17	508.67	927.78	0
64	0.22	3.53	1560.00	1800.00	240.00	1639.49	62.13	44.68	19.76	8.02	0.22	0.75	3.44	1.35	351.55	307.93	0
65	0.40	4.86	1908.15	2469.58	561.43	2242.56	132.39	62.07	25.39	11.80	0.21	1.08	2.68	4.70	0.00	0.00	0
66	0.50	3.87	1918.58	2480.00	561.42	2224.33	127.54	71.32	33.12	10.98	0.42	0.75	1.51	3.55	986.54	489.80	1
67	0.14	2.36	1688.50	2260.00	571.50	1919.08	164.52	64.41	36.05	8.90	0.32	0.02	0.13	0.04	0.00	0.00	1
68	0.23	2.43	2353.33	2800.00	446.67	2573.01	114.31	62.12	33.74	11.56	0.49	0.59	2.61	2.71	0.00	0.00	1
69	0.21	2.77	2350.31	2759.33	409.02	2542.04	77.88	63.61	25.74	12.95	0.35	0.16	0.73	0.63	0.00	0.00	1
70	0.17	2.55	1680.48	2260.00	579.52	1912.56	129.72	61.26	34.95	8.23	0.33	0.60	3.48	3.12	0.00	0.00	1
71	0.39	3.47	2722.53	3020.00	297.47	2878.26	74.30	62.68	20.13	8.64	0.40	0.55	1.44	2.28	0.00	0.00	1
72	0.30	3.62	2721.89	3000.00	278.11	2869.06	51.93	60.77	18.70	10.24	0.28	0.03	0.10	0.07	0.00	0.00	0
73	0.15	2.46	2260.00	2500.00	240.00	2397.62	65.78	53.73	20.40	9.10	0.31	0.36	2.40	1.51	0.00	0.00	1
74	0.41	3.38	2260.00	2680.00	420.00	2444.18	92.30	65.16	24.02	10.98	0.45	1.13	2.77	7.93	0.00	0.00	1
75	0.41	3.56	2822.47	3040.00	217.53	2934.44	47.60	65.13	16.77	9.68	0.40	0.83	2.04	4.46	0.00	0.00	1



AC	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Altitud mínima (m)	Altitud máxima (m)	Dif. altitudinal H (m)	Altitud promed. (m)	STD Altitud (m)	Pendiente máxima (grados)	Pendiente promedio (grados)	STD Pendiente (grados)	Rc	Densidad de drenaje			Longitud total de fallas (m)	Longitud total de fracturas (km)	AC de 1er orden
												L <sub>max</sub> (km)	tc (min)	tc (min)			
76	0.16	2.34	1540.00	1760.00	220.00	1602.37	52.65	65.12	19.04	12.53	0.37	0.43	2.66	2.37	155.35	0.00	0
77	0.28	3.86	1500.00	1760.00	260.00	1570.21	47.31	64.37	22.38	14.04	0.23	0.90	3.27	4.62	7.48	122.18	0
78	0.21	3.53	1768.02	2367.95	599.94	1996.86	157.24	64.14	25.74	12.64	0.21	0.99	4.83	6.33	0.00	0.00	1
79	0.79	5.79	2142.57	3040.00	897.43	2562.77	197.45	65.48	34.79	10.97	0.30	2.44	3.09	7.69	0.00	0.00	1
80	0.24	3.36	1780.00	2420.00	640.00	1994.99	176.89	67.21	25.10	15.38	0.27	0.20	0.84	0.59	0.00	0.00	1
81	0.36	4.62	2820.00	3000.00	180.00	2911.54	39.41	43.36	13.28	9.69	0.21	1.49	4.12	6.57	0.00	0.00	0
82	0.16	2.56	1620.00	1880.00	260.00	1775.34	50.10	51.52	18.92	9.83	0.31	0.64	3.98	4.59	0.00	7.37	0
83	0.34	3.70	2661.69	3020.00	358.31	2838.15	63.92	48.12	18.65	9.30	0.31	0.87	2.54	5.67	0.00	0.00	0
84	0.27	3.16	1552.99	1780.00	227.01	1622.47	55.41	67.03	20.13	12.31	0.34	0.48	1.77	1.98	442.46	380.94	0
85	0.12	2.04	2953.63	3020.00	66.37	2988.22	18.41	27.79	10.29	6.63	0.37	0.43	3.58	2.62	0.00	0.00	1
86	0.22	2.69	2200.00	2680.00	480.00	2422.32	99.00	65.75	32.25	10.64	0.38	0.74	3.41	8.04	0.00	0.00	1
87	0.71	4.43	2320.00	3020.00	700.00	2626.47	149.20	68.92	34.42	12.68	0.46	1.88	2.64	4.02	0.00	0.00	1
88	0.63	4.55	1700.00	2420.00	720.00	2044.75	201.30	71.13	35.22	10.98	0.38	1.46	2.33	6.92	185.39	0.00	1
89	0.41	3.48	2000.00	2500.00	500.00	2276.45	130.26	65.77	32.73	11.29	0.42	1.12	2.77	5.17	823.12	686.16	1
90	0.30	3.53	1675.16	2316.46	641.31	1884.96	109.65	72.93	24.44	15.47	0.30	1.12	3.72	5.92	0.00	0.00	1
91	0.24	3.98	2080.00	2614.43	534.43	2248.71	102.13	62.61	29.97	10.25	0.19	0.39	1.65	1.41	0.00	0.00	0
92	0.13	1.82	2200.00	2500.00	300.00	2383.20	70.54	67.63	29.61	10.33	0.48	0.52	4.13	2.33	0.00	0.00	1
93	0.14	2.06	1580.00	1856.51	276.51	1672.96	55.46	63.62	30.01	11.53	0.40	0.35	2.59	1.88	0.00	343.12	0
94	0.22	3.46	1620.00	1955.46	335.46	1754.87	75.13	61.42	27.38	11.84	0.23	0.00	0.00	1.73	0.00	322.23	0
95	0.22	3.42	1640.00	1910.02	270.02	1740.06	55.74	54.73	25.69	11.22	0.24	0.68	3.09	1.79	0.00	485.49	0
96	0.14	2.23	1560.00	1865.34	305.34	1625.57	63.77	66.34	19.27	12.61	0.34	0.60	4.39	3.56	238.68	0.00	1
97	0.34	4.45	2000.00	2406.76	406.76	2159.25	71.84	67.80	33.80	12.47	0.22	1.57	4.61	2.48	0.00	0.00	0
98	0.16	2.31	1581.14	2020.00	438.86	1801.12	93.35	60.57	34.17	9.14	0.38	0.76	4.69	4.04	0.00	0.00	1
99	1.09	8.38	2712.66	3157.80	445.14	2935.34	93.72	63.19	17.36	10.30	0.19	2.77	2.55	17.52	0.00	263.92	1
100	0.21	2.67	2140.00	2520.00	380.00	2308.12	89.97	66.03	34.83	12.14	0.37	0.69	3.28	3.23	0.00	0.00	0
101	0.24	3.07	2952.86	3117.03	164.17	3002.36	30.44	47.82	12.03	9.06	0.32	0.80	3.30	4.46	0.00	103.41	1
102	0.51	5.27	1777.01	2320.00	542.99	1997.96	108.56	74.61	36.26	13.41	0.23	1.52	2.98	3.35	183.23	0.00	0
103	0.53	5.37	2313.02	2760.00	446.98	2515.23	91.14	69.47	23.48	14.56	0.23	2.03	3.84	3.56	0.00	0.00	0
104	0.28	2.66	1660.00	2040.00	380.00	1893.66	89.06	66.11	32.70	8.91	0.49	0.74	2.66	3.83	0.00	0.00	1
105	0.17	2.35	2120.00	2560.00	440.00	2340.39	107.63	66.52	31.25	10.71	0.38	0.74	4.44	3.89	0.00	0.00	1
106	0.35	3.48	1695.68	2246.78	551.09	1869.81	130.29	75.23	36.67	12.99	0.37	0.66	1.87	3.34	0.00	0.00	0
107	0.88	5.75	1700.00	2274.68	574.68	1925.67	118.21	64.39	32.41	10.96	0.33	2.60	2.95	2.36	0.00	0.00	0
108	0.55	4.90	2520.00	3020.00	500.00	2842.27	90.42	65.81	20.88	10.51	0.29	1.60	2.91	8.48	0.00	0.00	1
109	0.22	2.81	1777.94	2340.00	562.06	2113.28	140.07	68.81	34.38	11.52	0.34	0.93	4.31	4.76	0.00	0.00	1
110	0.28	3.56	2020.00	2511.68	491.68	2261.36	117.21	65.23	29.08	10.72	0.27	1.08	3.93	5.43	0.00	0.00	1
111	0.26	3.41	2248.61	2660.00	411.39	2491.86	95.17	64.86	24.98	12.42	0.28	1.00	3.93	5.16	0.00	0.00	1
112	0.36	3.73	2020.00	2400.00	380.00	2195.14	86.11	62.58	27.21	10.90	0.32	1.12	3.14	4.85	919.73	0.00	0
113	0.18	2.44	2125.56	2539.43	413.87	2301.99	80.51	70.01	31.40	11.57	0.37	0.54	3.02	2.60	0.00	0.00	0
114	0.31	4.90	2140.00	2760.00	620.00	2429.81	150.64	62.81	26.19	12.84	0.16	1.25	3.99	5.65	0.00	0.00	1
115	0.32	3.26	2520.00	2860.00	340.00	2642.81	85.47	57.84	21.25	11.78	0.37	0.86	2.74	3.55	0.00	0.00	1
116	0.35	3.29	1940.00	2393.48	453.48	2173.07	105.51	64.26	27.51	11.04	0.41	1.12	3.20	6.87	0.00	0.00	1
117	0.20	2.43	2520.48	2660.00	139.52	2597.26	32.33	39.60	13.25	7.37	0.43	0.65	3.24	3.08	0.00	0.00	1

AC	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Altitud mínima (m)	Altitud máxima (m)	Dif. altitudinal H (m)	Altitud promed. (m)	STD Altitud (m)	Pendiente máxima (grados)	Pendiente promedio (grados)	STD Pendiente (grados)	Rc	Densidad de drenaje			Longitud total de fallas (m)	Longitud total de fracturas (km)	AC de 1er orden
												L <sub>max</sub> (km)	tc (min)	tc (min)			
118	0.64	4.29	2260.00	2760.00	500.00	2509.68	107.21	71.12	30.50	11.82	0.43	1.77	2.78	7.17	0.00	0.00	1
119	0.64	5.68	1857.12	2580.00	722.88	2266.36	142.21	62.87	28.26	11.73	0.25	1.80	2.84	10.09	0.00	1470.40	0
120	0.24	3.03	2179.43	2661.83	482.39	2371.04	103.28	65.08	33.54	10.57	0.33	0.47	1.92	1.88	283.10	0.00	0
121	0.33	3.52	1860.00	2300.00	440.00	2062.58	102.90	62.89	33.41	10.07	0.34	0.56	1.69	2.61	0.00	0.00	0
122	0.23	2.68	2203.71	2580.00	376.29	2366.60	73.10	63.33	26.64	12.10	0.40	0.80	3.54	4.22	140.21	0.00	1
123	0.27	3.26	1960.00	2340.00	380.00	2129.03	93.71	62.02	30.82	10.79	0.32	0.52	1.92	2.11	0.00	0.00	0
124	0.31	3.30	2334.61	2640.00	305.39	2519.85	68.03	64.38	22.76	11.33	0.36	0.06	0.19	0.23	0.00	0.00	1
125	0.15	1.93	2340.00	2734.46	394.46	2513.64	91.22	56.36	33.35	8.86	0.50	0.53	3.58	2.99	0.00	0.00	1
126	0.40	3.49	1980.00	2480.00	500.00	2194.64	95.79	66.12	29.69	10.39	0.41	0.92	2.31	5.18	0.00	0.00	1
127	0.29	2.92	2040.00	2480.00	440.00	2241.38	109.01	66.62	33.31	10.70	0.43	0.95	3.24	2.53	0.00	0.00	0
128	0.42	3.84	2134.43	2680.00	545.57	2440.78	129.92	63.40	34.00	10.29	0.35	1.42	3.41	3.21	0.00	39.70	1
129	0.13	2.31	2060.00	2480.00	420.00	2223.21	71.54	59.80	29.68	9.68	0.32	0.56	4.20	2.56	0.00	0.00	1
130	0.38	3.50	2141.87	2599.27	457.39	2374.01	109.51	66.73	34.03	10.69	0.39	0.83	2.17	4.28	0.00	0.00	1
131	0.32	3.40	2140.00	2540.00	400.00	2360.93	91.29	68.71	27.39	12.53	0.34	1.01	3.20	5.45	0.00	0.00	1

Abundancia proporcional de las Unidades de Respuesta Hidrológica Convencionales Preliminares (URHCP) en el Área de estudio (sin clases de pendiente).

ROCA	SUELO	NDVI	No. de polígonos	Superficie total (km <sup>2</sup> )	URHC No.	% de la unidad lito-edafológica	% del área de estudio
A Bva	Ao	0.2 a 0.3	2	0.0434	1	32.9	0.1
		0.3 a 0.4	5	0.0648	2	49.1	0.1
		0.4 a 0.5	3	0.0236	3	17.9	0.1
	Th+Ao	-0.1 a 0	10	0.0016	4	0.0	0.0
		0 a 0.1	2	0.0355	5	0.9	0.1
		0.1 a 0.2	11	0.1159	6	2.8	0.3
		0.2 a 0.3	51	0.4686	7	11.3	1.1
		0.3 a 0.4	52	1.0258	8	24.8	2.3
		0.4 a 0.5	29	2.4884	9	60.2	5.6
	Ao+Rd+I	-0.1 a 0	17	0.0275	10	0.2	0.1
		0 a 0.1	17	0.1656	11	0.9	0.4
		0.1 a 0.2	75	2.5884	12	14.2	5.9
		0.2 a 0.3	124	5.8844	13	32.3	13.3
		0.3 a 0.4	174	5.5364	14	30.3	12.5
	Ah+Ao+Th	0.4 a 0.5	128	4.0413	15	22.2	9.1
		0.1 a 0.2	27	0.3327	16	4.3	0.8
		0.2 a 0.3	52	1.5948	17	20.7	3.6
		0.3 a 0.4	62	2.5571	18	33.3	5.8
	A	Ah+Ao+Th	0.4 a 0.5	45	3.2017	19	41.7
-0.1 a 0			1	0.0059	20	0.2	0.0
0 a 0.1			2	0.0083	21	0.3	0.0
0.1 a 0.2			14	0.0349	22	1.1	0.1
0.2 a 0.3			50	0.3969	23	12.4	0.9
Ao+Th		0.3 a 0.4	45	1.1097	24	34.8	2.5
		0.4 a 0.5	29	1.6356	25	51.3	3.7
		-0.1 a 0	3	0.0038	26	0.5	0.0
		0 a 0.1	6	0.0171	27	2.0	0.0
		0.1 a 0.2	10	0.2291	28	27.3	0.5
		0.2 a 0.3	9	0.3456	29	41.2	0.8
		0.3 a 0.4	19	0.1386	30	16.5	0.3
Th+Ao		0.4 a 0.5	9	0.1048	31	12.5	0.2
		-0.1 a 0	4	0.0444	32	0.6	0.1
		0 a 0.1	11	0.0440	33	0.6	0.1
		0.1 a 0.2	31	0.1467	34	1.9	0.3
		0.2 a 0.3	61	0.5095	35	6.7	1.2
		0.3 a 0.4	76	1.0953	36	14.4	2.5
		0.4 a 0.5	17	5.7416	37	75.7	13.0
Igea	Ao	-0.1 a 0	2	0.0001	38	0.1	0.0
		0 a 0.1	2	0.0023	39	2.3	0.0
		0.1 a 0.2	4	0.0104	40	10.8	0.0
		0.2 a 0.3	6	0.0295	41	30.5	0.1
		0.3 a 0.4	5	0.0216	42	22.3	0.0
		0.4 a 0.5	4	0.0329	43	34.0	0.1
	Ah+Ao+Th	0.1 a 0.2	1	0.0045	44	0.2	0.0
		0.2 a 0.3	12	0.0682	45	3.0	0.2
		0.3 a 0.4	28	0.3999	46	17.5	0.9
		0.4 a 0.5	5	1.8140	47	79.3	4.1

# 3

## ABUNDANCIA PROPORCIONAL DE PARÁMETROS LÍTO-EDAFOLÓGICOS Y CLASES DE VALORES NDVI (año 2000) DE LAS 131 ÁREAS DE CAPTACIÓN

Abundancia proporcional de parámetros líto-edafológicos y clases de valores ndvi (año 2000) de las áreas de captación (AC) 1 a 50

AC	PROPORCIÓN DE TIPOS DE ROCA			PROPORCIÓN DE TIPO DE SUELO					PROPORCIÓN DE CLASES DE NDVI					
	Andesita y brecha volcánica	Andesita	Ignea extrusiva ácida	Acrisol		Acrisol ortico+Regosol distrito+ Litosol	Acrisol ortico+Andoso I húmico	Andosol húmico+Acriso I ortico	0.0 A	0.1	0.1 A 0.2	0.2 A 0.3	0.3 A 0.4	0.4 A 0.5
				húmico+Andosol ortico+ húmico	Andosol									
1	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	17.92	25.47	55.66
2	100.00	0.00	0.00	98.80	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.79	33.44	60.77
3	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.15	13.25	26.81	56.78
4	100.00	0.00	0.00	99.36	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.74	37.70	56.56
5	100.00	0.00	0.00	83.34	16.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.36	92.64
6	100.00	0.00	0.00	32.83	67.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.01	21.11	73.88
7	100.00	0.00	0.00	99.38	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.70	17.39	73.91
8	27.85	0.00	72.15	97.87	0.00	2.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	8.33	32.26	58.76
9	100.00	0.00	0.00	99.20	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.91	10.77	35.17	52.15
10	100.00	0.00	0.00	78.50	21.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.30	80.70
11	96.39	3.61	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	12.68	86.62
12	0.00	0.00	100.00	94.58	0.00	5.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	9.24	90.13
13	100.00	0.00	0.00	99.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.95	70.05
14	100.00	0.00	0.00	12.40	87.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	13.79	33.23	52.35
15	21.29	1.08	77.63	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.13	7.45	90.43
16	62.37	37.60	0.03	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.55	10.19	35.03	52.23
17	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.61	40.51	47.88
18	0.00	0.00	100.00	92.64	0.00	7.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.76	4.12	94.12
19	0.00	15.40	84.60	94.75	0.00	5.25	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	5.33	21.67	72.00
20	100.00	0.00	0.00	71.57	28.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.58	22.39	44.40	21.62
21	100.00	0.00	0.00	28.74	71.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.90	13.92	17.72	66.46

AC	PROPORCIÓN DE TIPOS DE ROCA			PROPORCIÓN DE TIPO DE SUELO					PROPORCIÓN DE CLASES DE NDVI						
	Andesita y brecha volcánica	Andesita	Ignea extrusiva ácida	Acrisol					Andosol húmico+Acrisol	0.0 A	0.1 A	0.2 A	0.3 A	0.4 A	0.5
				húmico+Acrisol	Acrisol	Acrisol	Acrisol	Andosol							
				ortico+ Andosol	ortico+Regosol	Acrisol	ortico+Andoso	húmico+Acrisol							
húmico	districo+ Litosol	órtico	l húmico	l ortico	-0.1 A 0.0	0.1	0.2	0.3	0.4						
22	100.00	0.00	0.00	22.36	77.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.17	41.18	38.66	
23	0.26	99.39	0.35	86.50	0.00	0.00	0.00	13.50	0.00	0.62	4.35	43.48	40.37	11.18	
24	0.00	39.58	60.42	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.96	41.74	52.29	
25	12.75	87.25	0.00	31.55	5.63	0.00	0.00	62.82	0.00	2.48	9.93	16.03	32.96	38.60	
26	0.00	99.59	0.41	69.19	0.00	0.00	0.00	30.81	0.00	0.00	8.82	29.41	42.65	19.12	
27	100.00	0.00	0.00	0.31	97.75	0.00	0.00	1.94	0.00	0.00	0.00	10.09	33.94	55.96	
28	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.28	34.44	39.44	15.83	
29	100.00	0.00	0.00	16.43	83.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.35	29.73	56.08	12.84	
30	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.09	89.91	
31	100.00	0.00	0.00	0.00	63.06	0.00	0.00	36.94	0.00	0.00	0.00	6.76	52.03	41.22	
32	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.05	45.35	18.60	
33	33.45	66.55	0.00	0.07	5.06	0.00	0.00	94.86	0.00	0.00	0.72	9.77	24.31	65.20	
34	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.89	55.74	6.56	0.82	
35	0.00	44.19	55.81	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	5.44	32.33	61.93	
36	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	46.43	27.78	25.00	
37	100.00	0.00	0.00	0.00	64.62	0.00	0.00	35.38	0.00	3.74	3.33	23.49	27.23	42.20	
38	0.00	99.98	0.02	97.69	0.00	0.00	0.51	1.80	0.00	0.00	0.56	7.22	47.22	45.00	
39	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.03	53.79	34.48	0.69	
40	0.00	100.00	0.00	13.97	0.00	0.00	46.54	39.49	6.22	4.56	23.65	33.61	18.67	13.28	
41	0.00	100.00	0.00	0.14	0.00	0.00	10.39	89.47	0.00	0.24	6.75	33.01	27.23	32.77	
42	0.00	100.00	0.00	96.19	0.00	0.00	0.00	3.81	0.40	1.00	1.20	6.97	24.90	65.54	
43	100.00	0.00	0.00	58.86	41.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.32	28.54	51.74	17.40	
44	100.00	0.00	0.00	0.00	66.81	0.00	0.00	33.19	0.00	0.00	2.58	28.87	42.78	25.77	
45	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.15	35.98	46.95	7.93	
46	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.27	36.36	42.73	18.64	
47	100.00	0.00	0.00	0.00	99.29	0.00	0.00	0.71	0.00	0.00	0.00	65.17	34.83	0.00	
48	0.00	100.00	0.00	56.98	0.00	0.00	42.93	0.08	0.00	0.00	28.33	20.83	35.83	15.00	
49	0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.94	87.06	
50	0.00	100.00	0.00	40.75	0.00	0.00	41.08	18.17	9.32	2.54	26.27	27.12	18.64	16.10	

**Abundancia proporcional de parámetros líto-edafológicos y clases de valores ndvi (año 2000) de las áreas de captación (AC) 51 a 100**

AC	PROPORCIÓN DE TIPOS DE ROCA			PROPORCIÓN DE TIPO DE SUELO					PROPORCIÓN DE CLASES DE NDVI						
	Andesita y brecha volcánica	Andesita	Ignea extrusiva ácida	Acrisol					Andosol húmico+Acrisol	0.0 A	0.1 A	0.2 A	0.3 A	0.4 A	0.5
				húmico+Acrisol	Acrisol	Acrisol	Acrisol	Andosol							
				ortico+ Andosol	ortico+Regosol	Acrisol	ortico+Andoso	húmico+Acrisol							
húmico	districo+ Litosol	órtico	húmico	ortico	-0.1 A 0.0	0.1	0.2	0.3	0.4						
51	100.00	0.00	0.00	99.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.03	50.86	37.07	6.03	
52	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.19	0.00	85.81	0.00	0.00	0.00	6.81	19.37	73.82	

AC	PROPORCIÓN DE TIPOS DE ROCA			PROPORCIÓN DE TIPO DE SUELO					PROPORCIÓN DE CLASES DE NDVI					
	Andesita y brecha volcánica	Andesita	Ignea extrusiva ácida	Acrisol					Andosol húmico+Acrisol	0.0 A	0.1 A	0.2 A	0.3 A	0.4 A
				húmico+ Acrisol	Acrisol	Acrisol	Acrisol	Andosol						
				ortico+ Andosol	ortico+Regosol	Acrisol	ortico+Andosol	húmico						
			húmico	districo+ Litosol	órtico	húmico	órtico	-0.1 A 0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	
53	100.00	0.00	0.00	21.51	78.49	0.00	0.00	0.00	0.00	1.70	75.74	10.64	11.49	0.43
54	100.00	0.00	0.00	1.87	98.13	0.00	0.00	0.00	0.76	7.63	11.45	47.33	22.90	9.92
55	0.00	100.00	0.00	77.82	0.00	0.00	2.23	19.95	0.00	0.00	0.00	0.00	7.41	92.59
56	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.92	0.00	76.08	0.00	0.00	0.00	23.57	55.71	20.71
57	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.42	0.00	80.58	0.00	0.00	0.00	0.00	20.00	80.00
58	0.00	100.00	0.00	44.24	0.00	0.00	43.18	12.58	0.00	0.00	0.00	26.47	39.22	34.31
59	0.00	100.00	0.00	55.20	0.00	0.00	0.00	44.80	1.35	1.68	0.67	7.41	28.28	60.61
60	0.00	100.00	0.00	5.16	0.00	0.00	55.48	39.36	1.42	6.64	14.22	42.18	20.85	14.69
61	100.00	0.00	0.00	0.00	62.72	0.00	0.00	37.28	0.00	0.00	0.00	41.41	21.88	36.72
62	100.00	0.00	0.00	32.50	67.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	64.97	31.47	3.05	0.00
63	100.00	0.00	0.00	60.66	39.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.26	43.43	31.75	2.55
64	100.00	0.00	0.00	56.80	43.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.22	49.32	33.11	1.35
65	100.00	0.00	0.00	0.00	59.02	0.00	0.00	40.98	0.00	0.00	4.10	26.87	23.88	45.15
66	100.00	0.00	0.00	0.00	95.16	0.00	0.00	4.84	0.00	3.02	21.45	36.56	37.16	1.81
67	100.00	0.00	0.00	9.73	90.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.45	44.44	10.10
68	42.13	57.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	2.67	24.00	73.33
69	81.95	18.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	9.79	20.28	33.57	36.36
70	100.00	0.00	0.00	4.48	95.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.40	60.50	28.57	2.52
71	0.00	100.00	0.00	21.02	0.00	0.00	18.74	60.24	0.00	0.00	0.00	7.28	11.49	81.23
72	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	46.46	53.54	0.00	0.00	4.12	10.82	14.95	70.10
73	100.00	0.00	0.00	0.00	30.31	0.00	0.00	69.69	0.00	0.00	1.02	5.10	46.94	46.94
74	100.00	0.00	0.00	0.00	7.49	0.00	0.00	92.51	0.00	0.00	0.00	0.37	3.32	96.31
75	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	1.48	19.93	78.60
76	100.00	0.00	0.00	9.23	90.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31.48	50.93	17.59	0.00
77	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.60	48.35	6.04	0.00
78	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.69	67.16	16.42	3.73
79	47.73	52.27	0.00	0.00	18.80	0.00	0.00	81.20	0.00	0.00	0.00	1.53	7.28	91.19
80	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	76.05	22.75	0.60
81	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.41	3.28	96.31
82	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47.62	46.67	5.71	0.00
83	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	3.10	22.57	74.34
84	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31.87	45.60	22.53	0.00
85	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.17	93.83
86	100.00	0.00	0.00	0.00	13.37	0.00	0.00	86.63	0.00	0.00	0.00	0.00	10.49	89.51
87	22.20	77.80	0.00	0.00	4.99	0.00	0.00	95.01	0.00	0.00	0.00	2.10	10.27	87.63
88	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.21	59.57	14.83	2.39
89	100.00	0.00	0.00	0.00	86.22	0.00	0.00	13.78	0.00	0.00	0.74	23.79	24.91	50.56
90	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.45	35.82	47.26	7.46
91	100.00	0.00	0.00	0.00	75.00	0.00	0.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.65	19.48	79.87
92	100.00	0.00	0.00	0.00	54.56	0.00	0.00	45.44	0.00	0.00	0.00	0.00	11.49	88.51

AC	PROPORCIÓN DE TIPOS DE ROCA			PROPORCIÓN DE TIPO DE SUELO					PROPORCIÓN DE CLASES DE NDVI						
	Andesita y brecha volcánica	Andesita	Igneá extrusiva ácida	Acrisol		Acrisol ortico+Regosol distrito+ Litosol	Acrisol ortico	Acrisol ortico+Andoso húmico	Andosol húmico+Acrisol ortico	0.0 A	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
				húmico+Acrisol ortico+ Andosol	húmico										
				0.0 A 0.0	0.1										
93	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	69.57	27.17	3.26	0.00	
94	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	5.41	9.46	22.97	50.00	11.49	0.68	
95	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.46	36.69	31.65	7.19	
96	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.44	17.78	70.00	7.78	0.00	
97	100.00	0.00	0.00	0.00	99.87	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.44	28.76	22.12	48.67	
98	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	3.70	21.30	61.11	13.89	0.00	0.00	
99	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.41	10.62	88.97	
100	100.00	0.00	0.00	0.00	99.33	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00	0.00	8.39	39.16	52.45	

**Abundancia proporcional de parámetros líto-edafológicos y clases de valores ndvi (año 2000) de las áreas de captación (AC) 101 a 131**

AC	PROPORCIÓN DE TIPOS DE ROCA			PROPORCIÓN DE TIPO DE SUELO					PROPORCIÓN DE CLASES DE NDVI							
	Andesita y brecha volcánica	Andesita	Igneá extrusiva ácida	Acrisol		Acrisol ortico+Regosol distrito+ Litosol	Acrisol ortico	Acrisol ortico+Andoso húmico	Andosol húmico+Acrisol ortico	-0.1 A	0.0 A	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
				húmico+Acrisol ortico+ Andosol	húmico											
				0.0	0.1											
101	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.61	10.98	88.41		
102	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.30	58.36	13.78	10.56		
103	69.02	30.98	0.00	0.00	15.74	0.00	0.00	84.26	0.00	0.00	9.55	24.16	21.63	44.66		
104	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	1.08	8.60	40.32	44.09	5.91	0.00		
105	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16.67	47.22	36.11		
106	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.84	2.94	46.64	37.39	12.18	0.00		
107	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.03	43.46	35.82	0.68		
108	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.26	96.74		
109	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	1.36	3.40	10.20	42.86	28.57	13.61		
110	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.78	33.52	46.70		
111	100.00	0.00	0.00	0.00	68.60	0.00	0.00	31.40	0.00	0.00	7.06	15.88	39.41	37.65		
112	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.11	71.97	20.92		
113	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.05	59.50	26.45		
114	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.45	6.91	51.61	35.02		
115	24.62	75.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	4.19	35.81	17.21	42.79		
116	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.51	29.66	55.08	9.75		
117	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.75	21.80	41.35	36.09		
118	100.00	0.00	0.00	0.00	95.57	0.00	0.00	4.43	0.00	0.00	4.74	15.64	38.86	40.76		
119	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.14	21.19	23.10	48.57		
120	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.27	36.94	40.13	21.66		
121	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.68	35.27	38.84	20.09	3.12		
122	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.16	58.06	36.77		

PROPORCIÓN DE TIPOS DE ROCA				PROPORCIÓN DE TIPO DE SUELO					PROPORCIÓN DE CLASES DE NDVI						
AC	Andesita y brecha volcánica	Andesita	Igneá extrusiva ácida	Acrisol		Acrisol órtico	Acrisol órtico+Andoso I húmico	Andosol húmico+Acriso I órtico	-0.1 A	0.0 A	0.1 A	0.2 A	0.3 A	0.4 A	0.4 A
				húmico+Andosol	húmico										
123	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.66	58.47	24.04	3.83	
124	100.00	0.00	0.00	0.00	45.41	0.00	0.00	54.59	0.00	3.76	4.69	16.90	47.89	26.76	
125	100.00	0.00	0.00	0.00	94.51	0.00	0.00	5.49	0.00	0.00	1.00	4.00	39.00	56.00	
126	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.44	32.20	50.00	11.36	
127	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.14	50.25	25.89	14.72	
128	100.00	0.00	0.00	0.00	89.59	0.00	0.00	10.41	0.00	0.00	0.00	22.02	34.66	43.32	
129	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.33	2.33	83.72	11.63	
130	100.00	0.00	0.00	0.00	96.98	0.00	0.00	3.02	0.00	0.39	5.12	39.37	31.89	23.23	
131	100.00	0.00	0.00	0.00	99.98	0.00	0.00	0.02	0.47	0.00	9.39	23.47	44.13	22.54	



# 4

## RELACIÓN DE FAMILIAS, ESPECIES Y GÉNEROS DE PLANTAS VASCULARES COLECTADOS EN LAS AC 18 Y 30

a= arbol, ar= arbusto; h= hierba; e= epífita, t= trepadora y p=parásita

Familia	Especie	Forma Biol.
AMARANTHACEAE		
	<i>Gomphrena dispersa</i> Standl.	h
AMARYLLIDACEAE		
	<i>Bomarea hirtella</i> (H.B.K.) Herb.	e
APIACEAE		
	<i>Arracacia atropurpurea</i> (Lehm.)Benth. & Hook.	h
	<i>Eryngium carlinae</i> F. Delaroché	h
AQUIFOLIACEA		
	<i>Ilex toluicana</i> Hemsl.	ar
ARALIACEAE		
	<i>Oreopanax xalapensis</i> (H.B.K.) Decne & Planch	ar
ASTERACEAE		
	<i>Ageratina mairetiana</i> (McVaugh) R.M. King & H. Rob	ar
	<i>Baccharis conferta</i> H.B.K.	ar
	<i>Baccharis salicifolia</i> (Ruiz & Pav.) Pers.	ar
	<i>Bidens aurea</i> (Aiton) Sherff	h
	<i>Cirsium ehrenbergii</i> Sch. Bip.	h_ar
	<i>Dahlia barkerae</i> Knowles & Westc.	ar
	<i>Gnaphalium salicifolium</i> (Bertol.) Sch. Bip.	h
	<i>Jaegeria hirta</i> (Lag.) Less.	h
	<i>Melampodium microcephalum</i> Less.	h
	<i>Montanoa grandiflora</i> Alaman ex DC.	ar
	<i>Pinaropappus roseus</i> (Less.) Less.	h
	<i>Rumfordia floribunda</i> DC.	ar
	<i>Senecio angulifolius</i> DC.	ar
	<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill.	h
	<i>Stevia lucida</i> Lag.	ar
	<i>Stevia ovata</i> Willd	ar
	<i>Tagetes micrantha</i> Cav.	h
	<i>Verbesina oncophora</i> B.L. Rob. & Greenm.	ar.
BEGONIACEAE		
	<i>Begonia gracilis</i> H.B.K.	h
BERBERIDACEAE		
	<i>Berberis moranensis</i> Hebenstr. & Ludw. Ex Schult.	ar
CAMPANULACEAE		
	<i>Lobelia laxiflora</i> H.B.K	ar
CARYOPHYLLACEAE		
	<i>Cerastium nutans</i> Raf.	h
	<i>Stellaria cuspidata</i> Willd. Ex Schlttdt.	h
CLETHRACEAE		
	<i>Clethra mexicana</i> A. DC.	a
CONVOLVULACEAE		
	<i>Cuscuta corumbosa</i> var. <i>grandiflora</i> Ruiz et Pavon Engelmann	p
CORNACEAE		
	<i>Cornus disciflora</i> Sessé & Moc. ex DC	a
FAGACEAE		
	<i>Quercus laurina</i> H.B.K.	a

Familia	Especie	Forma Biol.
	<i>Quercus obtusata</i> Humb. & Bonpl.	a
GERANIACEAE		
	<i>Geranium deltoideum</i> Rydb.	h
HIPPOCRATEACEAE		
	<i>Celastrum pringlei</i> Rose	ar
LAMIACEAE		
	<i>Salvia lavanduloides</i> Benth.	ar
	<i>Salvia mexicana</i> var. <i>Minor</i> Benth.	ar
	<i>Salvia purpurea</i> Cav.	ar
LOGANIACEAE		
	<i>Buddleia cordata</i>	
LILIACEAE		
	<i>Smilax pringlei</i> Greenm.	t
LYTHRACEAE		
	<i>Cuphea aequipetala</i> Cav.	h
MELASTOMACEAE		
	<i>Monochaetum calcaratum</i> (DC.) Triana	ar
ONAGRACEAE		
	<i>Lopezia miniata</i> Lag.ex DC	h
PAPAVERACEAE		
	<i>Bocconia frutescens</i> L.	ar
PIPERACEAE		
	<i>Peperomia hispidula</i> (Sw.) A. Dietr.	h
PLANTAGINACEAE		
	<i>Plantago alismatifolia</i> Pilg.	h
RANUNCULACEAE		
	<i>Ranunculus petiolaris</i> H.B.K. ex DC	h
RHAMNACEAE		
	<i>Ceanothus coeruleus</i> Lag.	ar
ROSACEAE		
	<i>Acaena elongata</i>	ar
	<i>Crateagus mexicana</i> Moc. & Sessé ex DC	a
	<i>Prunus serotina</i> ssp. <i>capuli</i> (Cav.) McVaugh	a
	<i>Rubus liebmannii</i> Focke	ar
SOLANACEAE		
	<i>Cestrum thyrsoides</i> H.B.K.	ar
	<i>Solanum cervantesii</i> Lag.	ar
STYRACACEAE		
	<i>Styrax argenteus</i> Greenm.	a
SYMPLOCACEAE		
	<i>Symplocos prionophylla</i> Hemsl.	a
THEACEAE		
	<i>Ternstroemia pringlei</i> (Rose) Standl.	a
URTICACEAE		
	<i>Urtica mexicana</i> Liebm.	ar
PINACEAE		
	<i>Abies religiosa</i> (H.B.K.) Schtdl. & Cham	a
	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	a
	<i>Pinus michoacana</i> var. <i>comuta</i> Martinez	a
POLIPODIACEAE		
	<i>Adiantum</i>	e
	<i>Asplenium</i>	e
	<i>Cheilanthes</i>	e
	<i>Dryopteris</i>	e
	<i>Pleopeltis</i>	e
	<i>Polypodium</i>	e
	<i>Pteris</i>	e
	<i>Thelypteris</i>	

a= arbol, ar= arbusto; h= hierba; e= epífita, t= trepadora y p=parásita.

# 5

## LAMINAS DE ESCURRIMIENTO EN LOS DISTINTOS TRATAMIENTOS OBSERVADOS EN BOSQUE, MATORRAL Y HERBAZAL A NIVEL DE LOTES EXPERIMENTALES

FECHA	LAMINA ESCURRIDA (mm) POR TRATAMIENTO							
	ppt (mm)	1 ARBOREO + SUELO DESNUDO	2 ARBOREO + HERBACEO	3 ARBOREO + HOJARASCA	4 ARBOREO COMPLETO	5 ARBUSIVO COMPLETO	6 HERBACEO COMPLETO	7 SUELO DESNUDO
10 DE JULIO	12	1	0	0	0	2	3	9
11 DE JULIO	0	0	0	0	0	0	0	0
12 DE JULIO	0	0	0	0	0	0	0	0
13 DE JULIO	30	3	1	1	0	6	8	26
14 DE JULIO	0	0	0	0	0	0	0	0
15 DE JULIO	13	2	0	0	0	2	3	10
16 DE JULIO	0	0	0	0	0	0	0	0
17 DE JULIO	10	1	0	0	0	2	4	5
18 DE JULIO	12	1	0	0	0	2	4	9
19 DE JULIO	8	0	0	0	0	2	3	4
20 DE JULIO	9	1	0	0	0	4	5	6
21 DE JULIO	11	1	0	0	0	3	4	8
22 DE JULIO	9	1	0	0	0	2	4	5
23 DE JULIO	0	0	0	0	0	0	0	0
24 DE JULIO	11	1	0	0	0	3	4	9
25 DE JULIO	20	3	0	0	0	3	5	8
26 DE JULIO	0	0	0	0	0	0	0	0
27 DE JULIO	20	4	0	0	0	5	6	8
28 DE JULIO	12	2	0	0	0	2	2	10
29 DE JULIO	8	0	0	0	0	2	3	6
30 DE JULIO	0	0	0	0	0	0	0	0
31 DE JULIO	0	0	0	0	0	0	0	0
1 DE AGOSTO	30	8	1	0	0	6	7	20
2 DE AGOSTO	20	2	0	0	0	2	4	8
3 DE AGOSTO	10	0	0	0	0	2	3	4
4 DE AGOSTO	19	2	0	0	0	2	4	15
5 DE AGOSTO	25	7	0	1	0	5	6	15
6 DE AGOSTO	0	0	0	0	0	0	0	0
7 DE AGOSTO	10	2	0	0	0	3	4	5
8 DE AGOSTO	30	8	2	1	2	5	7	28
9 DE AGOSTO	20	0	0	0	0	2	4	8
10 DE AGOSTO	30	4	0	0	0	3	7	28
11 DE AGOSTO	20	3	0	0	0	2	2	15
12 DE AGOSTO	10	2	0	0	0	1	1	2
13 DE AGOSTO	20	2	1	0	0	2	2	16

LAMINA ESCURRIDA (mm) POR TRATAMIENTO								
FECHA		1 ARBOREO + SUELO DESNUDO	2 ARBOREO + HERBACEO	3 ARBOREO + HOJARASCA	4 ARBOREO COMPLETO	5 ARBUSIVO COMPLETO	6 HERBACEO COMPLETO	7 SUELO DESNUDO
	ppt (mm)							
14 DE AGOSTO	10	3	1	0	0	2	2	4
15 DE AGOSTO	2	1	0	0	0	0	0	2
16 DE AGOSTO	10	2	2	1	0	2	2	4
17 DE AGOSTO	10	3	1	0	0	2	4	6
18 DE AGOSTO	50	8	3	3	2	8	8	48
19 DE AGOSTO	10	1	0	0	0	2	3	5
20 DE AGOSTO	0	0	0	0	0	0	0	0
21 DE AGOSTO	30	2	0	0	0	5	8	28
22 DE AGOSTO	20	8	1	1	0	3	5	16
23 DE AGOSTO	35	8	3	2	2	7	8	28
24 DE AGOSTO	0	0	0	0	0	0	0	0
25 DE AGOSTO	20	6	1	1	0	6	7	16
26 DE AGOSTO	20	5	1	0	0	5	6	17
27 DE AGOSTO	10	3	0	0	0	3	6	8
28 DE AGOSTO	10	2	0	0	0	2	2	4
29 DE AGOSTO	0	0	0	0	0	0	0	0
30 DE AGOSTO	40	8	2	2	2	8	8	38
31 DE AGOSTO	30	8	2	2	2	6	6	28
1 DE SEPTIEMBRE	10	2	0	0	0	2	4	6
2 DE SEPTIEMBRE	30	8	2	2	2	6	7	28
3 DE SEPTIEMBRE	20	5	1	1	1	5	6	16
4 DE SEPTIEMBRE	20	7	1	1	1	6	6	8
5 DE SEPTIEMBRE	10	3	1	1	1	3	4	6
6 DE SEPTIEMBRE	40	8	2	2	2	8	8	38
7 DE SEPTIEMBRE	10	3	1	1	0	3	3	5
8 DE SEPTIEMBRE	10	3	0	0	0	3	3	5
9 DE SEPTIEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
10 DE SEPTIEMBRE	20	5	1	1	1	3	5	10
11 DE SEPTIEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
12 DE SEPTIEMBRE	15	5	0	0	0	3	5	12
13 DE SEPTIEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
14 DE SEPTIEMBRE	20	6	1	1	1	3	3	16
15 DE SEPTIEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
16 DE SEPTIEMBRE	10	3	0	0	0	3	4	6
17 DE SEPTIEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
18 DE SEPTIEMBRE	20	7	1	1	0	6	6	17
19 DE SEPTIEMBRE	20	7	1	0	1	5	5	17
20 DE SEPTIEMBRE	30	8	2	2	2	7	8	28
21 DE SEPTIEMBRE	30	8	1	1	1	8	8	28
22 DE SEPTIEMBRE	10	3	0	0	0	3	3	6
23 DE SEPTIEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
24 DE SEPTIEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
25 DE SEPTIEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
26 DE SEPTIEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
27 DE SEPTIEMBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
28 DE SEPTIEMBRE	6	2	0	0	0	0	2	2
29 DE SEPTIEMBRE	10	2	1	0	1	0	2	8
30 DE SEPTIEMBRE	10	1	0	0	0	0	2	8
1 DE OCTUBRE	20	5	1	0	0	2	3	8
2 DE OCTUBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
3 DE OCTUBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
4 DE OCTUBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
5 DE OCTUBRE	20	5	0	0	0	2	2	8
6 DE OCTUBRE	25	5	0	0	0	2	2	15

FECHA	LAMINA ESCURRIDA (mm) POR TRATAMIENTO							
		1	2	3	4	5	6	7
	ppt (mm)	ARBOREO + SUELO DESNUDO	ARBOREO + HERBACEO	ARBOREO + HOJARASCA	ARBOREO COMPLETO	ARBUSIVO COMPLETO	HERBACEO COMPLETO	SUELO DESNUDO
7 DE OCTUBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
8 DE OCTUBRE	20	5	0	0	0	2	3	8
9 DE OCTUBRE	5	2	0	0	0	1	1	2
10 DE OCTUBRE	10	3	0	0	0	2	2	8
11 DE OCTUBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
12 DE OCTUBRE	9	2	0	0	0	1	1	2
13 DE OCTUBRE	10	2	0	0	0	1	1	8
14 DE OCTUBRE	30	8	1	1	1	6	7	28
15 DE OCTUBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
16 DE OCTUBRE	20	5	0	0	0	2	2	9
17 DE OCTUBRE	30	6	0	0	0	5	5	27
18 DE OCTUBRE	20	5	0	0	0	2	3	8
19 DE OCTUBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
20 DE OCTUBRE	15	3	0	0	0	2	2	12
21 DE OCTUBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
22 DE OCTUBRE	35	8	1	1	1	6	6	28
23 DE OCTUBRE	0	0	0	0	0	0	0	0
24 DE OCTUBRE	30	8	2	2	2	6	6	28

# 6

## LAMINAS INTERCEPTADAS EN LOS DISTINTOS TRATAMIENTOS OBSERVADOS (EN CONDICION ARBOREA) EN LOS LOTES EXPERIMENTALES

FECHA	PPT mm	TF.- lamina de pp directa (mm)				SF.- flujo caulinar (mm)				I.- Intercepcion (mm)				% INTERCEPCION			
		TRATAMIENTOS EN CONDICION ARBOREA				TRATAMIENTOS EN CONDICION ARBOREA				TRATAMIENTOS EN CONDICION ARBOREA				TRATAMIENTOS EN CONDICION ARBOREA			
		1 ARBOREO + SUELO DESNUDO	2 ARBOREO + HERBACEO	3 ARBOREO + HOJARASCA	4 ARBOREO COMPLETO	1 ARBOREO + SUELO DESNUDO	2 ARBOREO + HERBACEO	3 ARBOREO + HOJARASCA	4 ARBOREO COMPLETO	1 ARBOREO + SUELO DESNUDO	2 ARBOREO + HERBACEO	3 ARBOREO + HOJARASCA	4 ARBOREO COMPLETO	1 ARBOREO + SUELO DESNUDO	2 ARBOREO + HERBACEO	3 ARBOREO + HOJARASCA	4 ARBOREO COMPLETO
10 DE JULIO	12	4.52	3.40	4.45	3.86	0.10	0.00	0.01	0.00	7.38	8.60	7.54	8.14	61.50	71.68	62.82	67.80
11 DE JULIO	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
12 DE JULIO	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
13 DE JULIO	30	23.80	24.16	23.90	23.80	0.20	0.04	0.06	0.02	6.00	5.80	6.04	6.18	19.99	19.35	20.15	20.60
14 DE JULIO	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
15 DE JULIO	13	4.14	5.10	6.96	4.69	0.14	0.00	0.01	0.00	8.72	7.90	6.03	8.31	67.10	60.77	46.41	63.91
16 DE JULIO	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
17 DE JULIO	10	6.90	8.50	9.47	6.90	0.09	0.01	0.00	0.00	3.01	1.50	0.53	3.10	30.15	14.97	5.31	30.96
18 DE JULIO	12	4.14	5.10	7.80	4.42	0.05	0.00	0.00	0.00	7.81	6.90	4.20	7.58	65.06	57.49	35.03	63.20
19 DE JULIO	8	2.76	1.98	1.39	3.04	0.03	0.00	0.00	0.00	5.21	6.01	6.61	4.96	65.10	75.18	82.60	62.05
20 DE JULIO	9	4.14	3.96	3.90	3.86	0.05	0.01	0.00	0.00	4.81	5.03	5.10	5.14	53.41	55.87	56.69	57.07
21 DE JULIO	11	5.52	6.51	8.07	6.07	0.06	0.01	0.01	0.00	5.42	4.48	2.91	4.92	49.24	40.72	26.48	44.77
22 DE JULIO	9	3.73	5.38	5.85	3.86	0.04	0.00	0.01	0.00	5.23	3.62	3.15	5.14	58.13	40.21	34.96	57.07
23 DE JULIO	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
24 DE JULIO	11	6.90	7.08	7.24	7.18	0.07	0.01	0.00	0.00	4.03	3.91	3.76	3.82	36.59	35.57	34.16	34.73
25 DE JULIO	20	18.80	16.30	18.30	18.80	0.20	0.01	0.00	0.00	1.00	3.69	1.70	1.20	4.99	18.46	8.48	5.98
26 DE JULIO	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
27 DE JULIO	20	14.80	18.80	17.80	17.80	0.27	0.02	0.02	0.01	4.93	1.18	2.18	2.19	24.67	5.89	10.88	10.95
28 DE JULIO	12	8.28	8.50	9.74	8.83	0.16	0.00	0.01	0.00	3.56	3.50	2.24	3.17	29.67	29.17	18.68	26.40
29 DE JULIO	8	1.38	2.83	4.18	1.10	0.00	0.00	0.01	0.00	6.62	5.17	3.81	6.90	82.75	64.60	47.62	86.20
30 DE JULIO	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
31 DE JULIO	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
1 DE AGOSTO	30	23.90	24.50	24.90	23.80	0.53	0.04	0.01	0.02	5.57	5.46	5.09	6.18	18.56	18.22	16.98	20.60
2 DE AGOSTO	20	16.04	15.33	19.20	16.70	0.16	0.01	0.00	0.02	3.80	4.66	0.80	3.28	19.00	23.31	3.98	16.39
3 DE AGOSTO	10	1.38	1.42	5.57	2.21	0.00	0.00	0.00	0.00	8.62	8.58	4.43	7.79	86.20	85.84	44.32	77.92
4 DE AGOSTO	19	8.28	11.89	9.74	8.83	0.11	0.01	0.00	0.01	10.61	7.09	9.26	10.15	55.86	37.32	48.72	53.44
5 DE AGOSTO	25	18.50	18.50	18.50	18.50	0.48	0.02	0.04	0.01	6.02	6.48	6.46	6.49	24.08	25.92	25.83	25.94
6 DE AGOSTO	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
7 DE AGOSTO	10	1.93	1.42	4.18	2.21	0.11	0.00	0.00	0.00	7.96	8.58	5.82	7.79	79.61	85.84	58.24	77.92
8 DE AGOSTO	30	23.80	24.16	23.90	23.60	0.53	0.11	0.06	0.12	5.67	5.73	6.04	6.28	18.89	19.11	20.15	20.93
9 DE AGOSTO	20	15.42	16.23	16.40	15.80	0.03	0.01	0.01	0.01	4.55	3.76	3.59	4.19	22.76	18.78	17.93	20.96
10 DE AGOSTO	30	23.50	25.50	26.12	24.14	0.29	0.03	0.03	0.02	6.21	4.47	3.85	5.84	20.71	14.91	12.84	19.46
11 DE AGOSTO	20	17.42	19.40	16.10	20.20	0.21	0.01	0.01	0.01	2.37	0.59	3.89	-0.21	11.84	2.93	19.43	-1.04
12 DE AGOSTO	10	8.28	9.91	5.57	4.14	0.11	0.01	0.00	0.00	1.61	0.07	4.43	5.86	16.14	0.74	44.32	58.60
13 DE AGOSTO	20	18.80	18.80	18.80	19.01	0.14	0.04	0.02	0.01	1.06	1.16	1.18	0.98	5.30	5.82	5.89	4.88
14 DE AGOSTO	10	6.90	8.50	9.47	6.90	0.21	0.04	0.01	0.01	2.89	1.47	0.52	3.09	28.89	14.69	5.20	30.86
15 DE AGOSTO	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	2.00	2.00	2.00	100.00	100.00	100.00	100.00
16 DE AGOSTO	10	4.14	5.66	5.57	5.52	0.14	0.11	0.04	0.00	5.72	4.23	4.40	4.48	57.19	42.30	43.97	44.80
17 DE AGOSTO	10	4.14	4.25	5.57	2.76	0.21	0.04	0.03	0.03	5.65	5.72	4.40	7.21	56.49	57.17	44.04	72.12
18 DE AGOSTO	50	33.80	34.14	33.90	36.80	0.53	0.21	0.21	0.14	15.67	15.65	15.89	13.06	31.33	31.30	31.78	26.12
19 DE AGOSTO	10	4.14	4.25	5.57	4.14	0.05	0.02	0.00	0.00	5.81	5.73	4.43	5.86	58.07	57.31	44.32	58.60
20 DE AGOSTO	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
21 DE AGOSTO	30	23.80	24.16	23.90	23.80	0.16	0.03	0.03	0.03	6.04	5.81	6.07	6.17	20.13	19.37	20.24	20.57
22 DE AGOSTO	20	18.80	19.60	18.90	18.90	0.53	0.07	0.07	0.03	0.67	0.33	1.03	1.07	3.33	1.65	5.15	5.34
23 DE AGOSTO	35	23.80	24.16	23.19	23.80	0.53	0.18	0.15	0.15	10.67	10.66	11.66	11.05	30.48	30.45	33.32	31.57
24 DE AGOSTO	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
25 DE AGOSTO	20	18.80	17.70	19.50	17.20	0.43	0.05	0.04	0.03	0.77	2.25	0.46	2.77	3.87	11.23	2.29	13.84
26 DE AGOSTO	20	16.04	17.33	18.70	18.80	0.32	0.05	0.02	0.03	3.64	2.62	1.28	1.17	18.20	13.08	6.39	5.84
27 DE AGOSTO	10	6.90	8.50	9.47	6.90	0.21	0.02	0.01	0.00	2.89	1.48	0.52	3.10	28.87	14.83	5.24	31.00
28 DE AGOSTO	10	4.14	4.25	8.35	2.76	0.11	0.01	0.00	0.00	5.75	5.74	1.65	7.24	57.53	57.41	16.48	72.40
29 DE AGOSTO	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				

FECHA	PPT mm	TF.- lamina de pp directa (mm)				SF.- flujo caulinar (mm)				I.- Intercepcion (mm)				% INTERCEPCION				
		TRATAMIENTOS EN CONDICION ARBOREA																
		PLUVIOMETRO	1 ARBOREO+ SUELO DESNUDO	2 ARBOREO+ HERBACEO	3 ARBOREO+ HOJARASCA	4 ARBOREO COMPLETO	1 ARBOREO+ SUELO DESNUDO	2 ARBOREO+ HERBACEO	3 ARBOREO+ HOJARASCA	4 ARBOREO COMPLETO	1 ARBOREO+ SUELO DESNUDO	2 ARBOREO+ HERBACEO	3 ARBOREO+ HOJARASCA	4 ARBOREO COMPLETO	1 ARBOREO+ SUELO DESNUDO	2 ARBOREO+ HERBACEO	3 ARBOREO+ HOJARASCA	4 ARBOREO COMPLETO
30 DE AGOSTO	40	33.80	34.16	33.90	33.80	0.53	0.11	0.11	0.11	5.67	5.73	5.99	6.09	14.17	14.33	14.98	15.23	
31 DE AGOSTO	30	23.80	24.16	23.92	23.80	0.53	0.11	0.11	0.11	5.67	5.73	5.97	6.09	18.89	19.11	19.91	20.31	
1 SEPTIEMBRE	10	9.66	8.50	9.14	9.66	0.16	0.01	0.02	0.01	0.18	1.49	0.84	0.33	1.80	14.93	8.39	3.29	
2 SEPTIEMBRE	30	23.80	24.60	23.80	26.80	0.53	0.11	0.11	0.11	5.67	5.29	6.09	3.09	18.89	17.64	20.31	10.31	
3 SEPTIEMBRE	20	15.04	18.30	18.90	18.93	0.32	0.05	0.05	0.05	4.64	1.65	1.05	1.02	23.20	8.23	5.23	5.08	
4 SEPTIEMBRE	20	16.40	18.80	19.00	17.50	0.48	0.05	0.06	0.04	3.12	1.15	0.94	2.46	15.60	5.73	4.68	12.29	
5 SEPTIEMBRE	10	9.04	9.33	8.35	9.04	0.21	0.05	0.05	0.05	0.75	0.62	1.59	0.91	7.47	6.17	15.95	9.07	
6 SEPTIEMBRE	40	33.80	34.16	33.20	33.80	0.53	0.11	0.11	0.11	5.67	5.73	6.69	6.09	14.17	14.33	16.73	15.23	
7 SEPTIEMBRE	10	9.04	8.50	8.35	8.28	0.21	0.05	0.04	0.01	0.75	1.45	1.61	1.71	7.47	14.51	16.05	17.09	
8 SEPTIEMBRE	10	9.04	8.50	8.35	8.28	0.21	0.01	0.01	0.01	0.75	1.49	1.64	1.71	7.47	14.93	16.37	17.09	
9 SEPTIEMBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
10 SEPTIEMBRE	20	18.90	18.90	19.10	19.04	0.32	0.05	0.05	0.05	0.78	1.05	0.85	0.91	3.90	5.23	4.23	4.53	
11 SEPTIEMBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
12 SEPTIEMBRE	15	11.04	8.50	11.14	8.28	0.32	0.03	0.02	0.01	3.64	6.47	3.84	6.71	24.27	43.15	25.62	44.73	
13 SEPTIEMBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
14 SEPTIEMBRE	20	12.42	11.33	11.14	12.42	0.43	0.09	0.05	0.04	7.15	8.59	8.81	7.54	35.77	42.93	44.05	37.69	
15 SEPTIEMBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
16 SEPTIEMBRE	10	6.90	4.25	5.57	5.52	0.21	0.01	0.01	0.01	2.89	5.74	4.42	4.47	28.87	57.41	44.21	44.69	
17 SEPTIEMBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
18 SEPTIEMBRE	20	12.42	12.74	13.92	13.80	0.48	0.05	0.04	0.03	7.10	7.20	6.04	6.17	35.50	36.01	30.19	30.84	
19 SEPTIEMBRE	20	12.42	11.33	13.92	13.80	0.48	0.06	0.03	0.05	7.10	8.61	6.05	6.15	35.50	43.04	30.24	30.73	
20 SEPTIEMBRE	30	24.40	26.30	26.90	26.70	0.53	0.11	0.11	0.11	5.07	3.59	2.99	3.19	16.89	11.98	9.98	10.64	
21 SEPTIEMBRE	30	25.60	24.60	28.30	27.10	0.53	0.10	0.10	0.09	3.87	5.30	1.60	2.81	12.89	17.68	5.35	9.38	
22 SEPTIEMBRE	10	8.28	5.66	5.57	5.52	0.21	0.02	0.01	0.00	1.51	4.31	4.42	4.48	15.07	43.15	44.21	44.80	
23 SEPTIEMBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
24 SEPTIEMBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
25 SEPTIEMBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
26 SEPTIEMBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
27 SEPTIEMBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
28 SEPTIEMBRE	6	4.14	2.83	4.18	0.00	0.11	0.01	0.00	0.00	1.75	3.16	1.82	6.00	29.22	52.62	30.40	100.00	
29 SEPTIEMBRE	10	2.76	4.25	2.78	0.00	0.16	0.04	0.03	0.04	7.08	5.71	7.18	9.96	70.80	57.09	71.84	99.57	
30 SEPTIEMBRE	10	2.76	2.83	1.39	0.00	0.05	0.02	0.03	0.00	7.19	7.15	8.58	10.00	71.87	71.47	85.76	100.00	
1 OCTUBRE	20	13.80	11.33	8.35	8.28	0.32	0.05	0.03	0.02	5.88	8.62	11.62	11.70	29.40	43.09	58.08	58.49	
2 OCTUBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
3 OCTUBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
4 OCTUBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
5 OCTUBRE	20	11.04	11.33	13.92	12.42	0.32	0.02	0.01	0.00	8.64	8.65	6.07	7.58	43.20	43.25	30.35	37.90	
6 OCTUBRE	25	18.25	18.50	19.14	19.42	0.32	0.03	0.03	0.00	6.43	6.47	5.83	5.58	25.72	25.87	23.31	22.32	
7 OCTUBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
8 OCTUBRE	20	16.80	18.50	19.50	18.10	0.32	0.03	0.03	0.01	2.88	1.47	0.47	1.89	14.40	7.34	2.34	9.45	
9 OCTUBRE	5	4.14	2.83	4.18	0.00	0.11	0.01	0.01	0.00	0.75	2.16	0.81	5.00	15.07	43.15	16.27	100.00	
10 OCTUBRE	10	8.28	5.66	8.35	5.52	0.21	0.03	0.03	0.02	1.51	4.30	1.62	4.46	15.07	43.04	16.16	44.59	
11 OCTUBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
12 OCTUBRE	9	4.14	5.66	5.57	4.14	0.11	0.02	0.02	0.00	4.75	3.31	3.41	4.86	52.81	36.83	37.90	54.00	
13 OCTUBRE	10	5.52	4.25	8.35	0.00	0.11	0.01	0.01	0.00	4.37	5.74	1.64	10.00	43.73	57.41	16.37	100.00	
14 OCTUBRE	30	26.80	25.90	28.20	28.30	0.53	0.05	0.05	0.05	2.67	4.05	1.75	1.65	8.89	13.49	5.82	5.49	
15 OCTUBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
16 OCTUBRE	20	16.40	18.50	17.14	18.28	0.32	0.02	0.02	0.03	3.28	1.48	2.84	1.69	16.40	7.39	14.19	8.44	
17 OCTUBRE	30	27.60	26.60	27.50	28.80	0.43	0.03	0.03	0.02	1.97	3.37	2.47	1.18	6.58	11.23	8.23	3.93	
18 OCTUBRE	20	13.80	11.33	12.53	13.80	0.32	0.03	0.02	0.01	5.88	8.64	7.45	6.19	29.40	43.20	37.25	30.95	
19 OCTUBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
20 OCTUBRE	15	11.04	11.33	11.92	8.28	0.21	0.02	0.02	0.01	3.75	3.65	3.06	6.71	24.98	24.34	20.39	44.73	
21 OCTUBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
22 OCTUBRE	35	23.80	23.80	23.80	23.80	0.53	0.05	0.05	0.04	10.67	11.15	11.15	11.16	30.48	31.85	31.85	31.88	
23 OCTUBRE	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
24 OCTUBRE	30	23.80	24.50	25.60	28.30	0.53	0.11	0.11	0.11	5.67	5.39	4.29	1.59	18.89	17.98	14.31	5.31	

# 7

## CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS EVENTOS DE PRECIPITACION MUESTREADOS CADA 5 MINUTOS EN LOS PUNTOS DE DRENAJE DE LAS AC EXPERIMENTALES

Evento ID	Fecha	hr. aprox.	Intensidad prom. (mm/h)	Magnitud (mm)	Duración (min)	t antecedente sin pp (min)	t en alcanzar l max (min)	Intensidad máx. 5 min (mm)
1	Jul.16	20:00	10	7	40	2880	15	3.81
2	Jul.17	15:00	8	7	50	1115	10	1.52
3	Jul.17	17:30	3	5	95	105	30	0.76
4	Jul.18	22:35	5	6	70	1615	10	1.27
5	Jul.19	18:50	4	7	110	1140	55	1.52
6	Jul.20	15:00	2	8	270	925	110	0.58
7	Jul.20	23:00	4	2	30	335	15	0.76
8	Jul.21	13:30	1	1	45	845	5	0.51
9	Jul.22	01:00	3	7	130	615	10	0.76
10	Jul.23	13:20	1	1	105	2085	5	0.51
11	Jul.24	03:15	3	11	190	725	15	1.02
12	Jul.24	08:35	3	2	35	135	30	0.51
13	Jul.24	16:00	11	6	30	405	20	2.54
14	Jul.24	19:00	5	2	25	115	20	0.76
15	Jul.25	03:30	3	7	160	445	20	1.52
16	Jul.26	18:10	7	3	25	2200	15	0.76
17	Jul.26	21:00	9	14	95	140	25	2.79
18	Jul.27	04:00	5	4	45	325	20	0.76
19	Jul.27	16:00	3	11	195	655	25	3.03
20	Jul.28	14:00	1	4	175	1120	15	0.76
21	Jul.31	11:00	16	22	80	3990	20	4.06
22	Jul.31	17:00	4	7	95	270	10	2.03
23	Ags.1	13:00	4	6	90	1160	15	0.76
24	Ags.1	18:40	2	5	115	130	60	0.76
25	Ags.1	22:45	5	8	95	135	15	1.02
26	Ags.2	18:00	9	6	40	1025	10	2.28
27	Ags.3	18:00	2	3	95	1405	70	0.51
28	Ags.3	20:00	3	6	135	355	40	0.51
29	Ags.3	23:00	2	6	180	30	5	0.25
30	Ags.4	12:30	2	1	30	650	25	0.51



Evento ID	Fecha	hr. aprox.	Intensidad prom. (mm/h)	Magnitud (mm)	Duración (min)	t antecedente sin pp (min)	t en alcanzar l max (min)	Intensidad máx. 5 min (mm)
31	Ags.4	14:30	5	12	130	85	25	2.29
32	Ags.4	19:30	5	6	70	165	10	2.29
33	Ags.4	21:15	3	2	40	40	15	0.51
34	Ags.5	00:00	1	1	65	70	25	0.25
35	Ags.6	15:30	12	2	10	2365	10	1.52
36	Ags.6	20:40	3	8	170	180	100	1.52
37	Ags.7	15:30	27	43	95	1060	30	6.86
38	Ags 16	13:00	4	4	65	13110	40	1.27
39	Ags 16	17:20	3	3	65	195	45	0.76
40	Ags 17	18:15	1	3	255	130	5	0.25
41	Ags 19	02:45	2.33	3	85	1695	5	0.76
42	Ags 19	13:55	1.91	8	240	585	40	1.77
43	Ags 19	19:25	2.76	10	210	90	15	1.01
44	Ags 20	18:45	1.45	5	220	1190	50	0.51
45	Ags 21	05:25	2.37	4	90	420	25	0.76
46	Ags 22	15:45	14.58	17	70	1980	30	4.06
47	Ags 23	00:45	4.25	20	280	470	25	1.52
48	Ags 24	00:00	2.25	4	115	1115	5	0.51
49	Ags 24	17:10	6.37	6	55	915	5	2.03
50	Sep-03	16:19	3.24	8.38	155	14331	5	1.52
51	Sep-04	16:14	1.37	2.29	100	1280	5	0.51
52	Sep-04	23:24	3.11	11.94	230	330	15	2.29
53	Sep-05	15:34	2.19	11.68	320	740	245	2.79
54	Sep-05	23:34	3.19	5.84	110	160	10	1.27
55	Sep-06	15:49	8.85	15.49	105	865	10	4.32
56	Sep-07	21:14	3.05	3.56	70	1660	20	0.51
57	Sep-08	15:34	21.34	28.45	80	1030	50	6.10
58	Sep-10	16:24	3.11	13.72	265	2850	25	3.05
59	Sep-12	22:39	0.68	1.02	90	2990	5	0.25
60	Sep-15	14:44	3.56	3.56	60	3755	40	0.76
61	Sep-15	21:54	3.24	12.7	235	370	20	0.76
62	Sep-16	15:29	1.11	2.03	110	820	35	0.76
63	Sep-16	21:29	6.68	14.48	130	250	95	2.03
64	Sep-18	20:04	1.36	1.02	45	2665	5	0.25
65	Sep-19	16:14	15.92	11.94	45	1165	25	2.54
66	Sep-20	15:39	2.29	2.29	60	1380	25	0.51
67	Sep-20	20:19	7.43	9.91	80	200	10	3.81
68	Sep-21	13:34	7.55	13.21	105	955	45	2.54
69	Sep-22	06:19	1.93	3.05	95	900	30	0.51
70	Sep-22	14:54	4.81	7.62	95	420	10	2.03
71	Sep-24	14:09	1.36	3.05	135	2740	45	0.51
72	Sep-25	18:17	1.44	2.28	95	1568	5	0.25
73	Sep-26	14:47	0.42	0.762	110	1135	5	0.25
74	Sep-26	10:32	2.29	0.762	20	355	5	0.51
75	Sep-27	11:47	1.71	4.57	160	775	5	1.01

<b>Evento ID</b>	<b>Fecha</b>	<b>hr. aprox.</b>	<b>Intensidad prom. (mm/h)</b>	<b>Magnitud (mm)</b>	<b>Duración (min)</b>	<b>t antecedente sin pp (min)</b>	<b>t en alcanzar l max (min)</b>	<b>Intensidad máx. 5 min (mm)</b>
76	Sep-27	19:17	2.99	12.95	260	290	175	2.28
77	Sep-28	13:02	0.63	2.79	265	805	5	0.51
78	Sep-29	18:07	1.59	5.84	220	1345	30	0.76
79	Sep-30	15:32	0.28	1.52	330	1065	320	0.51
80	Oct-01	15:02	4.71	8.63	110	1410	45	2.28
81	Oct-01	20:07	1.01	1.77	105	195	5	0.25
82	Oct-05	16:32	0.35	3.55	610	5440	275	0.51
83	Oct-06	15:02	0.64	2.28	215	740	5	0.76
84	Oct-06	21:32	2.31	4.82	125	175	20	0.76
85	Oct-07	12:37	1.80	3.302	110	780	15	0.51
86	Oct-08	12:52	2.87	4.31	90	1345	25	1.27
87	Oct-08	19:07	1.48	16.76	680	285	520	0.76
88	Oct-09	14:07	6.86	4.57	40	460	5	1.52
89	Oct-11	18:17	3.04	3.04	60	3090	15	1.01
90	Oct-12	17:32	0.51	0.762	90	1335	5	0.25
91	Oct-13	14:13	9.95	12.44	75	1150	29	2.79

# 8

## RELACION DE PARAMETROS EVALUADOS DE LAS TORMENTAS Y LAS DESCARGAS OBSERVADOS Y CALCULADOS MEDIANTE EL MODELO DEL SCS EN AC 18

Evento ID AC 18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Intensidad prom. (m/h)	Magnitud (m)	Duración (h)	t antecedente sin pp (h)	t en alcanzar pp max (h)	t pp_max-tp (h)	Tp_observado (hr)	Tp_esperado (modelo SCS) (h)	qp_obs(m3/h)	qp esperada (modelo SCS) (m3/h)	tp (h) observado
1	0.0010	0.0069	0.67	48.00	0.25	0.17	0.83	0.37	911.52	914.64	12.50
2	0.0010	0.0069	0.83	18.58	0.17	0.75	1.00	0.45	345.60	762.20	---
3	0.0010	0.0051	1.58	1.75	0.50	0.92	1.50	0.83	278.64	351.30	1.00
4	0.0010	0.0064	1.17	26.92	0.17	0.83	1.00	0.62	248.40	697.59	5.92
5	0.0010	0.0074	1.83	19.00	0.92	0.83	1.75	0.95	455.76	470.93	16.17
6	0.0010	0.0079	4.50	15.42	1.83	2.42	4.08	2.28	311.04	216.78	5.75
7	0.0010	0.0020	0.50	5.58	0.25	0.58	0.83	0.28	278.64	66.21	6.58
8	0.0010	0.0010	0.75	14.08	0.08	0.50	0.50	0.41	218.16	295.56	0.25
9	0.0010	0.0071	2.17	10.25	0.17	2.08	2.25	1.12	380.16	352.79	27.25
10	0.0010	0.0010	1.75	34.75	0.08	0.33	0.42	0.91	190.08	354.68	0.17
11	0.0010	0.0109	3.17	12.08	0.25	1.08	1.33	1.62	496.80	911.80	---
12	0.0010	0.0018	0.58	2.25	0.50	0.25	0.75	0.33	345.60	15.01	---
13	0.0010	0.0056	0.50	6.75	0.33	0.17	0.50	0.28	537.84	1191.50	---
14	0.0010	0.0023	0.42	1.92	0.33	0.92	1.25	0.24	380.16	78.66	---
15	0.0010	0.0074	2.67	7.42	0.33	0.75	1.08	1.37	762.48	760.74	28.92
16	0.0010	0.0028	0.42	36.67	0.25	0.25	0.50	0.24	762.48	364.72	---
17	0.0010	0.0137	1.58	2.33	0.42	0.58	1.00	0.83	2691.36	1474.21	---
18	0.0010	0.0041	0.75	5.42	0.33	0.17	0.50	0.41	762.48	760.37	---
19	0.0010	0.0107	3.25	10.92	0.42	0.50	1.08	1.66	1350.00	1098.74	---
20	0.0010	0.0041	2.92	18.67	0.25	0.42	0.58	1.49	624.24	651.75	43.58
21	0.0010	0.0218	1.33	66.50	0.33	0.25	0.58	0.70	3393.36	3524.39	---
22	0.0010	0.0071	1.58	4.50	0.17	0.58	0.75	0.83	1594.08	1058.36	---
23	0.0010	0.0058	1.50	19.33	0.25	0.42	0.67	0.78	810.00	946.02	---
24	0.0010	0.0046	1.92	2.17	1.00	0.25	1.25	0.99	810.00	363.82	---
25	0.0010	0.0076	1.58	2.25	0.25	1.00	1.33	0.83	1179.36	641.62	---
26	0.0010	0.0060	0.67	17.08	0.17	0.17	0.33	0.37	859.68	1971.52	---
27	0.0010	0.0029	1.58	23.42	1.17	0.17	1.33	0.83	455.76	144.80	---
28	0.0010	0.0061	2.25	5.92	0.67	0.92	1.58	1.16	581.04	419.70	---
29	0.0010	0.0058	3.00	0.50	0.08	2.00	2.17	1.53	669.60	291.08	---
30	0.0010	0.0010	0.50	10.83	0.42	0.08	0.50	0.28	380.16	295.56	---
31	0.0010	0.0117	2.17	1.42	0.42	0.17	0.58	1.12	1531.44	2211.41	---
32	0.0010	0.0064	1.17	2.75	0.17	0.50	0.75	0.62	1784.16	930.13	---
33	0.0010	0.0023	0.67	0.67	0.25	0.33	0.83	0.37	1015.20	117.99	---
34	0.0010	0.0013	1.08	1.17	0.42	0.58	1.00	0.58	859.68	147.78	---
35	0.0010	0.0020	0.17	39.42	0.17	0.42	0.58	0.12	455.76	94.59	---
36	0.0010	0.0084	2.83	3.00	1.67	0.33	2.08	1.45	624.24	453.46	---
37	0.0010	0.0430	1.58	17.67	0.50	0.17	0.75	0.83	17431.20	3906.43	16.75
50	0.0010	0.0084	2.58	238.85	0.08	0.33	0.50	1.33	4147.20	1888.94	---

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Evento ID AC 18	Intensidad prom. (m/h)	Magnitud (m)	Duración (h)	t antecedente sin pp (h)	t en alcanzar pp max (h)	t pp_max-tp (h)	Tp_observado (hr)	Tp_esperado (modelo SCS) (h)	qp_obs(m3/h)	qp esperada (modelo SCS) (m3/h)	tp (h) observado
51	0.0010	0.0023	1.67	21.33	0.08	2.33	2.42	0.87	419.04	40.96	---
52	0.0010	0.0119	3.83	5.50	0.25	0.50	0.83	1.95	1291.68	1577.13	---
53	0.0010	0.0117	5.33	12.33	4.08	0.50	4.75	2.70	1470.96	271.50	---
54	0.0010	0.0058	1.83	2.67	0.17	1.08	1.33	0.95	380.16	473.01	14.50
55	0.0010	0.0155	1.75	14.42	0.17	0.50	0.75	0.91	1123.20	2160.58	14.42
56	0.0010	0.0036	1.17	27.67	0.33	0.33	0.67	0.62	380.16	455.53	7.25
57	0.0010	0.0285	1.33	17.17	0.83	0.33	1.25	0.70	9283.68	1921.31	43.67
58	0.0010	0.0137	4.42	47.50	0.42	0.67	1.17	2.24	419.04	1263.91	32.25
59	0.0010	0.0010	1.50	49.83	0.08	0.67	0.83	0.78	345.60	177.34	17.42
60	0.0010	0.0036	1.00	62.58	0.67	0.17	0.92	0.53	248.40	331.29	2.50
61	0.0010	0.0127	3.92	6.17	0.33	1.00	1.33	1.99	496.80	1038.37	9.00
62	0.0010	0.0020	1.83	13.67	0.58	0.67	1.25	0.95	496.80	43.87	4.75
63	0.0010	0.0145	2.17	4.17	1.58	0.42	2.08	1.12	2118.96	738.60	32.08
64	0.0010	0.0010	0.75	44.42	0.08	0.17	0.33	0.41	123.12	443.35	0.17
65	0.0010	0.0119	0.75	19.42	0.42	0.50	1.00	0.41	1069.20	1314.27	7.08
66	0.0010	0.0023	1.00	23.00	0.42	0.92	1.42	0.53	278.64	69.88	---
67	0.0010	0.0099	1.33	3.33	0.17	0.50	0.67	0.70	859.68	1668.44	7.58
68	0.0010	0.0132	1.75	15.92	0.75	0.33	1.17	0.91	2118.96	1225.81	9.50
69	0.0010	0.0031	1.58	15.00	0.50	0.42	1.50	0.83	218.16	149.07	
70	0.0010	0.0076	1.58	7.00	0.17	0.75	0.92	0.83	455.76	933.27	3.25
71	0.0010	0.0031	2.25	45.67	0.75	1.50	2.33	1.16	248.40	95.83	---
72	0.0010	0.0023	1.58	26.13	0.08	1.50	1.67	0.83	496.80	58.39	---
73	0.0010	0.0008	1.83	18.92	0.08	1.33	1.50	0.95	248.40	98.52	1.25
74	0.0010	0.0008	0.33	5.92	0.08	0.08	0.08	0.20	218.16	1773.38	1.17
75	0.0010	0.0046	2.67	12.92	0.08	0.17	0.33	1.37	248.40	1363.45	---
76	0.0010	0.0130	4.33	4.83	2.92	0.08	3.08	2.20	714.96	456.33	19.17
77	0.0010	0.0028	4.42	13.42	0.08	1.33	1.25	2.24	496.80	145.37	9.17

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Evento ID AC 30	Intensidad prom. (m/h)	Magnitud (m)	Duración (h)	t antecedente sin pp (h)	t en alcanzar pp max (h)	t pp_max-tp (h)	Tp_observado (hr)	Tp_esperado (modelo SCS) (h)	qp_obs(m3/h)	qp esperada (modelo SCS) (m3/h)	tp (h) observado
38	0.00100	0.0041	1.08	218.50	0.67	1.00	1.67	0.57	540.00	148.61	---
39	0.00100	0.0033	1.08	3.25	0.75	0.50	1.25	0.57	537.84	137.56	23.75
40	0.00100	0.0028	4.25	2.17	0.08	0.08	0.08	2.15	218.16	1422.80	0.42
41	0.00100	0.0033	1.42	28.25	0.08	0.67	0.83	0.73	190.08	206.09	2.67
42	0.00100	0.0076	4.00	9.75	0.67	0.42	0.92	2.03	419.04	608.97	8.75
43	0.00100	0.0097	3.50	1.50	0.25	1.67	2.00	1.78	496.80	353.91	---
44	0.00100	0.0053	3.67	19.83	0.83	1.00	1.92	1.86	537.84	191.20	21.75
45	0.00100	0.0036	1.50	7.00	0.42	0.83	1.25	0.78	419.04	157.72	---
46	0.00100	0.0170	1.17	33.00	0.50	0.42	1.00	0.61	1915.92	1132.89	---
47	0.00100	0.0198	4.67	7.83	0.42	0.75	1.25	2.36	1656.72	1007.23	72.08
48	0.00100	0.0043	1.92	18.58	0.08	1.17	1.25	0.98	455.76	217.47	---
49	0.00100	0.0058	0.92	15.25	0.08	1.25	1.33	0.48	2328.48	308.65	---
78	0.00100	0.0058	3.67	22.42	0.50	0.58	1.17	1.86	669.60	352.74	17.92
79	0.00100	0.0015	5.50	17.75	5.33	1.50	1.17	2.78	248.40	82.65	0.75
80	0.00100	0.0086	1.83	23.50	0.75	0.08	1.00	0.94	537.84	634.82	1.92
81	0.00100	0.0018	1.75	3.25	0.08	1.33	1.17	0.90	248.40	5.51	0.17
82	0.00100	0.0036	10.17	90.67	4.58	1.58	1.67	5.11	218.16	118.29	1.75
83	0.00100	0.0023	3.58	12.33	0.08	0.58	0.67	1.82	248.40	95.25	2.67
84	0.00100	0.0048	2.08	2.92	0.33	0.75	1.33	1.07	311.04	239.94	4.25
85	0.00100	0.0033	1.83	13.00	0.25	0.67	1.25	0.94	278.64	137.56	1.67
86	0.00100	0.0043	1.50	22.42	0.42	0.17	0.67	0.78	278.64	407.76	---
87	0.00100	0.0168	11.33	4.75	8.67	0.75	9.50	5.69	496.80	117.98	---
88	0.00100	0.0046	0.67	7.67	0.08	0.25	0.33	0.36	345.60	889.66	4.42
89	0.00100	0.0030	1.00	51.50	0.25	0.25	0.58	0.53	345.60	248.34	5.33
90	0.00100	0.0008	1.50	22.25	0.08	0.58	0.75	0.78	248.40	128.57	0.83
91	0.00100	0.0124	1.25	19.17	0.48	0.50	0.92	0.65	1069.20	968.64	21.67

# 9

**VALORES PONDERADOS DE S Y CN  
INGRESADOS AL MODELO GEOMÉTRICO  
DEL ÁREA DE ESTUDIO PARA LA  
GENERACIÓN DEL ESCENARIO BASAL.**

**PRECIPITACION OBSERVADA EN 7  
EVENTOS DE 2004**

**RESULTADOS DE LA  
SIMULACION DE FLUJOS DE DESCARGAS  
PARA DICHOS EVENTOS EN TRES  
ESCENARIOS AMBIENTALES**

**VALORES PONDERADOS DE S Y CN  
INGRESADOS AL MODELO GEOMÉTRICO  
DEL ÁREA DE ESTUDIO PARA LA  
GENERACIÓN DEL *ESCENARIO UNO*. LOS  
VALORES DE PERIODO DE RETARDO (tp)  
PERMANECEN IGUALES EN TODAS LAS  
SUBUNIDADES.**

Valores ponderados de S y CN ingresados al modelo geométrico del área de estudio para la generación del escenario basal.

Nombre de subunidad	S	CN	tp (min)	Nombre de subunidad	S	CN	tp (min)	Nombre de subunidad	S	CN	tp (min)
R1000W1000	9.53	76.84	6.56	R1500W1500	8.27	76.09	9.39	R430W430	9.64	77.89	7.25
R1010W1010	8.98	76.50	3.47	R1510W1510	9.80	76.09	6.96	R450W450	7.30	81.12	8.24
R1020W1020	8.84	78.52	3.23	R1520W1520	8.30	75.97	6.62	R470W470	8.28	78.04	9.80
R1030W1030	9.40	78.88	4.92	R1530W1530	6.50	77.16	10.67	R480W480	10.94	77.08	7.50
R1040W1040	8.10	78.42	7.89	R1550W1550	8.25	76.59	8.94	R500W500	10.99	77.00	7.13
R1050W1050	10.19	76.63	2.79	R1560W1560	5.73	78.95	7.71	R520W520	9.83	77.81	9.46
R1060W1060	8.25	77.39	6.66	R1570W1570	6.87	75.63	3.84	R530W530	7.40	80.04	7.92
R1070W1070	8.18	77.56	5.12	R1580W1580	6.12	81.32	4.99	R550W550	10.10	77.34	8.60
R1080W1080	9.00	76.23	6.39	R1590W1590	7.94	67.57	3.23	R560W560	7.90	79.78	13.36
R1090W1090	10.33	76.72	6.32	R1600W1600	9.90	75.27	3.90	R570W570	10.16	76.86	6.64
R1100W1100	11.00	77.00	0.00	R1610W1610	6.10	75.66	6.14	R580W580	5.48	40.75	2.07
R1110W1110	8.35	78.96	4.99	R1620W1620	6.06	77.32	2.52	R600W600	6.20	83.43	6.70
R1120W1120	8.12	78.77	6.25	R1630W1630	6.65	78.03	4.38	R610W610	10.01	78.00	6.78
R1130W1130	5.94	83.21	3.74	R1650W1650	6.78	77.02	5.30	R620W620	6.95	81.23	6.82
R1140W1140	9.45	77.63	8.27	R1660W1660	5.68	78.12	3.29	R630W630	6.83	80.32	4.57
R1150W1150	9.30	78.04	5.05	R1670W1670	4.94	79.78	9.45	R640W640	9.59	77.82	8.99
R1160W1160	8.33	78.20	8.24	R1680W1680	6.63	77.18	6.39	R660W660	10.16	78.08	2.79
R1170W1170	7.24	77.95	1.04	R1690W1690	6.75	76.73	9.98	R670W670	8.11	78.70	5.36
R1180W1180	7.79	79.19	5.77	R170W170	10.73	77.36	5.80	R680W680	8.06	78.33	7.31
R1190W1190	8.25	76.25	4.17	R1710W1710	8.10	76.73	6.25	R690W690	6.59	81.06	5.39
R1200W1200	9.51	77.67	5.12	R1720W1720	5.24	78.89	6.62	R700W700	7.97	75.88	4.08
R120W120	10.25	77.36	8.50	R1750W1750	9.49	75.64	4.38	R710W710	7.99	78.38	6.32
R1220W1220	7.36	77.17	5.87	R1770W1770	6.66	78.85	6.23	R720W720	9.58	76.61	11.21
R1230W1230	7.17	79.78	7.52	R1780W1780	7.45	76.42	7.97	R730W730	10.26	77.38	8.99
R1240W1240	6.77	80.11	5.80	R1790W1790	5.99	79.18	8.77	R760W760	8.63	76.63	4.04
R1250W1250	9.44	76.24	5.87	R1800W1800	5.48	78.47	6.76	R790W790	8.23	77.15	5.27
R1260W1260	8.71	78.05	6.07	R180W180	7.44	77.26	9.73	R800W800	9.46	76.38	8.50
R1270W1270	6.40	83.33	0.00	R1880W1880	6.27	78.37	7.75	R810W810	8.37	76.46	8.50
R1280W1280	8.25	76.25	1.93	R1890W1890	5.45	78.76	10.71	R820W820	9.74	76.77	6.36
R1290W1290	7.27	76.27	4.34	R190W190	10.82	76.95	15.68	R830W830	7.63	76.17	5.39
R1300W1300	7.87	76.04	7.97	R2000W2000	6.01	77.92	6.96	R840W840	6.88	77.59	5.39
R130W130	10.19	76.67	4.64	R200W200	11.02	76.61	1.04	R850W850	9.25	76.72	6.58
R1310W1310	9.01	76.65	6.23	R2060W2060	6.22	77.14	6.54	R860W860	8.19	79.64	5.09
R1320W1320	7.69	77.72	6.23	R2090W2090	7.00	75.00	0.00	R870W870	9.67	76.93	4.38
R1330W1330	6.52	77.45	5.94	R2100W2100	10.26	74.12	6.09	R890W890	9.69	76.82	12.48
R1340W1340	6.21	78.90	4.17	R220W220	9.26	79.32	10.81	R900W900	9.58	76.70	5.82
R1350W1350	8.19	77.63	6.11	R230W230	10.93	73.54	4.86	R940W940	8.99	77.94	6.47
R1360W1360	6.00	75.00	0.00	R240W240	10.35	75.13	1.58	R950W950	6.72	81.93	5.02
R1370W1370	7.39	75.82	7.79	R250W250	8.95	77.44	7.31	R960W960	7.03	78.35	5.41
R1380W1380	6.66	77.53	4.75	R260W260	9.23	78.47	6.32	R970W970	8.76	78.38	4.46
R1390W1390	11.00	77.00	0.00	R300W300	10.73	76.93	4.75	R980W980	8.21	79.11	4.26
R1400W1400	7.79	78.89	4.64	R320W320	8.81	76.11	1.93	R990W990	8.11	76.76	5.80
R1410W1410	5.35	79.25	5.97	R330W330	11.00	77.00	3.35				
R1420W1420	8.75	77.88	5.80	R340W340	11.00	77.00	7.86				
R1430W1430	5.72	76.91	7.36	R350W350	6.56	82.06	6.49				
R1440W1440	8.68	77.44	4.13	R360W360	7.75	80.43	7.00				
R1450W1450	3.95	84.71	3.74	R370W370	7.46	81.27	6.11				
R1460W1460	5.70	77.86	6.14	R380W380	7.71	77.33	6.34				
R1470W1470	7.70	79.03	4.92	R400W400	10.77	76.62	8.47				
R1480W1480	7.10	79.26	7.05	R410W410	7.96	78.77	8.18				

Tormenta con las características del evento 19 del 27 de Julio de 2004.

t (min)	pp (mm)	flujo escenario basal (m <sup>3</sup> /s) 2003	flujo escenario uno (m <sup>3</sup> /s) 2013	flujo escenario dos (m <sup>3</sup> /s) 2013
0	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.25	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.01	0.01	0.01
15	0.00	0.01	0.01	0.01
20	1.02	0.02	0.02	0.02
25	3.30	0.07	0.09	0.09
30	2.03	0.20	0.52	0.47
35	1.27	0.60	2.10	1.89
40	0.76	1.24	4.16	3.78
45	0.25	1.48	4.59	4.23
50	0.00	1.07	3.19	2.97
55	0.00	0.55	1.62	1.52
60	0.25	0.52	1.41	1.32
65	0.00	0.55	1.43	1.34
70	0.00	0.32	0.83	0.78
75	0.25	0.46	1.10	1.03
80	0.00	0.56	1.35	1.27
85	0.00	0.33	0.80	0.76
90	0.00	0.15	0.38	0.36
95	0.00	0.07	0.18	0.17
100	0.00	0.03	0.08	0.08
105	0.00	0.02	0.04	0.04
110	0.00	0.01	0.02	0.02
115	0.00	0.00	0.01	0.01
120	0.00	0.00	0.01	0.00
125	0.00	0.00	0.00	0.00
130	0.25	0.35	0.77	0.71
135	0.00	0.56	1.26	1.19
140	0.00	0.34	0.77	0.73
145	0.25	0.55	1.18	1.11
150	0.00	0.70	1.52	1.43
155	0.25	0.85	1.78	1.68
160	0.00	0.90	1.86	1.77
165	0.00	0.51	1.08	1.03
170	0.00	0.24	0.51	0.49
175	0.00	0.11	0.24	0.23
180	0.00	0.05	0.11	0.11
185	0.25	0.51	0.98	0.92
190	0.00	0.80	1.55	1.47
195	0.25	1.01	1.92	1.83
200	0.00	1.09	2.05	1.96
205	0.00	0.62	1.19	1.15
210	0.00	0.29	0.56	0.54
215	0.00	0.13	0.27	0.26
220	0.00	0.06	0.13	0.12
225	0.00	0.03	0.06	0.06
230	0.00	0.01	0.03	0.03
235	0.00	0.01	0.01	0.01
240	0.00	0.00	0.01	0.01
245	0.00	0.00	0.00	0.00
250	0.00	0.00	0.00	0.00
255	0.00	0.00	0.00	0.00
260	0.00	0.00	0.00	0.00

Tormenta con las características del evento 42 del 19 de Agosto de 2004

t (min)	pp (mm)	flujo escenario basal (m <sup>3</sup> /s) 2003	flujo escenario uno (m <sup>3</sup> /s) 2013	flujo escenario dos (m <sup>3</sup> /s) 2013
0	0	0.000	0	0
5	0.508	0.006	0.006	0.006
10	0.508	0.021	0.021	0.021
15	0.254	0.028	0.028	0.028
20	0	0.023	0.023	0.023
25	0	0.013	0.013	0.013
30	1.778	0.028	0.029	0.029
35	0.508	0.059	0.061	0.061
40	1.016	0.065	0.08	0.08
45	1.778	0.111	0.334	0.307
50	0	0.138	0.513	0.476
55	0	0.089	0.325	0.307
60	0.254	0.070	0.276	0.252
65	0	0.067	0.284	0.258
70	0	0.040	0.167	0.155
75	0	0.019	0.077	0.073
80	0	0.009	0.035	0.034
85	0.254	0.043	0.184	0.161
90	0.508	0.192	0.768	0.678
95	0	0.247	0.98	0.882
100	0	0.147	0.575	0.529
105	0	0.070	0.263	0.244
110	0	0.032	0.12	0.112
115	0	0.015	0.056	0.052
120	0	0.007	0.026	0.025
125	0	0.004	0.012	0.012
130	0	0.002	0.006	0.005
135	0	0.001	0.002	0.002
140	0	0.000	0.001	0.001
145	0	0.000	0	0
150	0	0.000	0	0
155	0	0.000	0	0
160	0	0.000	0	0
165	0	0.000	0	0
170	0	0.000	0	0
175	0	0.000	0	0
180	0	0.000	0	0
185	0	0.000	0	0
190	0	0.000	0	0
195	0	0.000	0	0
200	0	0.000	0	0
205	0	0.000	0	0
210	0	0.000	0	0
215	0	0.000	0	0
220	0	0.000	0	0
225	0	0.000	0	0
230	0	0.000	0	0
235	0	0.000	0	0
240	0.254	0.091	0.315	0.28
245	0	0.146	0.527	0.476
250	0	0.089	0.324	0.298
255	0	0.042	0.15	0.138
260	0	0.019	0.069	0.064



t (min)	pp (mm)	flujo escenario basal (m <sup>3</sup> /s) 2003	flujo escenario uno (m <sup>3</sup> /s) 2013	flujo escenario dos (m <sup>3</sup> /s) 2013
265	0	0.009	0.032	0.03
270	0	0.004	0.015	0.014
275	0	0.002	0.007	0.007
280	0	0.001	0.003	0.003
285	0	0.000	0.002	0.001
290	0	0.000	0.001	0.001
295	0	0.000	0	0

Tormenta con las características del evento 54 del 5 de Septiembre de 2004

t (min)	pp (mm)	flujo escenario basal (m <sup>3</sup> /s) 2003	flujo escenario uno (m <sup>3</sup> /s) 2013	flujo escenario dos (m <sup>3</sup> /s) 2013
0	0	0	0	0
5	0.508	0.006	0.006	0.006
10	1.27	0.03	0.03	0.03
15	0.508	0.053	0.053	0.053
20	0	0.046	0.045	0.045
25	0	0.025	0.025	0.025
30	0.254	0.015	0.015	0.015
35	0	0.013	0.013	0.013
40	0	0.008	0.008	0.008
45	0.508	0.01	0.01	0.01
50	0.508	0.023	0.025	0.025
55	0.508	0.032	0.038	0.038
60	0.254	0.033	0.043	0.043
65	0.254	0.028	0.042	0.042
70	0.254	0.024	0.046	0.045
75	0.254	0.022	0.057	0.055
80	0	0.018	0.054	0.052
85	0.254	0.015	0.049	0.047
90	0.254	0.019	0.076	0.072
95	0	0.02	0.079	0.075
100	0	0.013	0.047	0.044
105	0	0.006	0.022	0.021
110	0.254	0.01	0.048	0.044
115	0	0.017	0.074	0.069
120	0	0.012	0.048	0.046
125	0	0.006	0.023	0.022
130	0	0.003	0.01	0.01
135	0	0.001	0.005	0.005
140	0	0.001	0.002	0.002
145	0	0	0.001	0.001
150	0	0	0	0

Tormenta con las características del evento 84 del 6 de Octubre de 2004.

t (min)	pp (mm)	flujo escenario basal (m <sup>3</sup> /s) 2003	flujo escenario uno (m <sup>3</sup> /s) 2013	flujo escenario dos (m <sup>3</sup> /s) 2013
0	0.000	0	0	0
5	0.254	0.003	0.003	0.003
10	0.254	0.01	0.01	0.01
15	0.508	0.019	0.019	0.019
20	0.762	0.032	0.032	0.032
25	0.000	0.036	0.036	0.036
30	0.254	0.026	0.026	0.026
35	0.254	0.021	0.021	0.021
40	0.000	0.017	0.017	0.017
45	0.254	0.013	0.013	0.013
50	0.000	0.012	0.012	0.012
55	0.000	0.007	0.007	0.007
60	0.254	0.007	0.007	0.007
65	0.254	0.012	0.012	0.012
70	0.000	0.013	0.014	0.014
75	0.508	0.015	0.016	0.016
80	0.254	0.021	0.025	0.025
85	0.000	0.019	0.023	0.023
90	0.254	0.014	0.018	0.018
95	0.000	0.012	0.016	0.016
100	0.000	0.008	0.01	0.01
105	0.254	0.007	0.011	0.01
110	0.254	0.012	0.023	0.022
115	0.000	0.013	0.026	0.025
120	0.000	0.008	0.015	0.015
125	0.254	0.007	0.019	0.018
130	0.000	0.009	0.026	0.025
135	0.000	0.006	0.017	0.016
140	0.000	0.003	0.008	0.008
145	0.000	0.001	0.004	0.004
150	0.000	0.001	0.002	0.002
155	0.000	0	0.001	0.001
160	0.000	0	0	0

Tormenta con las características del evento 65 del 19 de Septiembre de 2004.

t (min)	pp (mm)	flujo escenario basal (m <sup>3</sup> /s) 2003	flujo escenario uno (m <sup>3</sup> /s) 2013	flujo escenario dos (m <sup>3</sup> /s) 2013
0	0.000	0.000	0	0
5	0.254	0.003	0.003	0.003
10	0.000	0.007	0.007	0.007
15	2.032	0.031	0.031	0.031
20	2.032	0.086	0.094	0.094
25	2.540	0.224	0.667	0.602
30	1.524	0.917	3.117	2.802
35	2.286	4.414	10.948	10.121
40	1.016	8.529	18.109	17.05
45	0.254	8.499	16.515	15.723
50	0.000	5.435	10.226	9.798
55	0.000	2.686	5.087	4.894
60	0.000	1.241	2.399	2.313
65	0.000	0.579	1.144	1.106
70	0.000	0.274	0.554	0.537
75	0.000	0.129	0.269	0.261
80	0.000	0.060	0.13	0.126
85	0.000	0.027	0.062	0.06
90	0.000	0.012	0.029	0.028
95	0.000	0.005	0.014	0.013
100	0.000	0.002	0.007	0.006
105	0.000	0.001	0.003	0.003
110	0.000	0.000	0.002	0.002
115	0.000	0.000	0.001	0.001
120	0.000	0.000	0	0
125	0.000	0.000	0	0
130	0.000	0.000	0	0
135	0.254	0.831	1.28	1.223
140	0.000	1.351	2.102	2.02
145	0.000	0.819	1.29	1.248
150	0.000	0.382	0.608	0.589
155	0.000	0.175	0.285	0.277
160	0.000	0.083	0.136	0.133
165	0.000	0.040	0.066	0.064
170	0.000	0.019	0.033	0.032
175	0.254	0.888	1.345	1.286
180	0.000	1.434	2.189	2.107
185	0.000	0.869	1.342	1.3
190	0.000	0.406	0.633	0.614
195	0.000	0.187	0.296	0.288
200	0.000	0.088	0.142	0.138
205	0.000	0.042	0.069	0.067
210	0.000	0.020	0.034	0.033
215	0.000	0.010	0.016	0.016
220	0.000	0.005	0.008	0.008
225	0.000	0.002	0.004	0.004
230	0.000	0.001	0.002	0.002
235	0.000	0.000	0.001	0.001
240	0.000	0.000	0	0

Tormenta con las características del evento 91 del 13 de Octubre de 2004.

t (min)	pp (mm)	flujo escenario basal (m <sup>3</sup> /s) 2003	flujo escenario uno (m <sup>3</sup> /s) 2013	flujo escenario dos (m <sup>3</sup> /s) 2013
0	0.000	0	0	0
5	0.508	0.006	0.006	0.006
10	2.032	0.04	0.04	0.04
15	2.286	0.097	0.121	0.12
20	2.794	0.444	1.537	1.369
25	2.540	3.236	8.839	8.112
30	0.508	5.614	13.976	13.059
35	0.254	4.947	11.376	10.762
40	0.508	4.508	9.258	8.806
45	0.254	4.466	8.424	8.052
50	0.254	3.999	7.156	6.865
55	0.254	3.762	6.428	6.178
60	0.000	2.889	4.851	4.679
65	0.000	1.533	2.595	2.514
70	0.000	0.713	1.228	1.192
75	0.254	1.211	1.934	1.86
80	0.000	1.586	2.498	2.408
85	0.000	0.941	1.497	1.451
90	0.000	0.439	0.708	0.688
95	0.000	0.202	0.333	0.324
100	0.000	0.095	0.159	0.156
105	0.000	0.045	0.077	0.076
110	0.000	0.022	0.038	0.037
115	0.000	0.01	0.018	0.018
120	0.000	0.005	0.009	0.009
125	0.000	0.002	0.004	0.004
130	0.000	0.001	0.002	0.002
135	0.000	0	0.001	0.001
140	0.000	0	0	0
145	0.000	0	0	0
150	0.000	0	0	0
185	0.000	0	0	0
190	0.000	0	0	0
195	0.000	0	0	0
200	0.000	0	0	0
205	0.000	0	0	0
210	0.000	0	0	0
215	0.254	0.927	1.4	1.341
220	0.000	1.508	2.297	2.214
225	0.000	0.916	1.41	1.367
230	0.000	0.428	0.665	0.646
235	0.000	0.197	0.312	0.304
240	0.000	0.093	0.149	0.145
245	0.000	0.045	0.072	0.071
250	0.000	0.022	0.036	0.035
255	0.000	0.01	0.017	0.017
260	0.000	0.005	0.008	0.008
265	0.000	0.002	0.004	0.004
270	0.000	0.001	0.002	0.002
275	0.000	0	0.001	0.001
280	0.000	0	0	0

Tormenta con las características del evento 37 del 7 de Agosto de 2004.

t (min)	pp (mm)	flujo escenario basal (m <sup>3</sup> /s) 2003	flujo escenario uno (m <sup>3</sup> /s) 2013	flujo escenario dos (m <sup>3</sup> /s) 2013
0	0.000	0	0	0
5	1.524	0.019	0.013	0.013
10	1.016	0.056	0.029	0.029
15	2.794	0.097	0.021	0.021
20	3.556	1.289	0.097	0.096
25	4.572	13.884	61.841	59.271
30	6.858	65.255	194.968	189.335
35	6.604	153.111	289.351	283.423
40	4.064	212.831	293.412	288.661
45	4.064	233.973	229.88	226.725
50	3.048	237.031	139.947	138.259
55	2.540	221.915	70.352	69.587
60	1.016	181.536	50.957	50.381
65	0.508	124.34	44.633	44.146
70	0.000	73.161	25.391	25.153
75	0.254	41.217	29.865	29.523
80	0.254	29.205	34.757	34.375
85	0.000	20.113	20.601	20.409
90	0.000	10.666	9.803	9.719
95	0.254	9.51	4.651	4.615
100	0.000	9.663	2.246	2.23
105	0.000	5.622	1.105	1.098
110	0.000	2.688	0.552	0.548
115	0.000	1.28	0.268	0.267
120	0.000	0.62	0.131	0.131
125	0.000	0.305	0.061	0.061
130	0.000	0.151	18.035	17.799
135	0.000	0.073	29.48	29.146
140	0.000	0.035	18.125	17.955
145	0.000	0.017	26.904	26.595
150	0.000	0.008	34.01	33.646
155	0.000	0.004	38.972	38.555
160	0.000	0.002	40.126	39.717
165	0.000	0.001	23.307	23.104
170	0.000	0.001	11.086	10.998
175	0.000	0	5.262	5.224
180	0.000	0	2.547	2.53
185	0.000	0	20.129	19.89
190	0.000	0	31.524	31.194
195	0.000	0	38.467	38.07
200	0.000	0	40.519	40.121
205	0.000	0	23.6	23.403
210	0.000	0	11.223	11.136
215	0.000	0	5.323	5.286
220	0.000	0	2.578	2.562
225	0.000	0	1.259	1.251
230	0.000	0	0.627	0.624
235	0.000	0	0.304	0.303
240	0.000	0	0.15	0.149
245	0.000	0	0.071	0.071
250	0.000	0	0.035	0.035
255	0.000	0	0.018	0.018
260	0.000	0	0.009	0.009
265	0.000	0	0.006	0.006
270	0.000	0	0.003	0.003

Valores ponderados de S y CN ingresados al modelo geométrico del área de estudio para la generación del **escenario uno**. Los valores de periodo de retardo (tp) permanecen iguales en todas las subunidades.

Nombre de subunidad	S	CN	Nombre de subunidad	S	CN	Nombre de subunidad	S	CN	Nombre de subunidad	S	CN
R1000W1000	7.43	77.86	R1350W1350	5.80	80.40	R1770W1770	5.40	80.80	R560W560	5.67	80.67
R1010W1010	7.78	77.11	R1360W1360	6.00	80.00	R1780W1780	6.00	79.83	R570W570	3.44	84.44
R1020W1020	6.25	79.75	R1370W1370	5.80	80.40	R1790W1790	5.40	80.80	R580W580	7.00	78.75
R1030W1030	6.80	78.80	R1380W1380	6.25	79.75	R1800W1800	5.75	80.25	R600W600	5.67	80.67
R1040W1040	6.25	79.75	R1390W1390	7.67	77.33	R180W180	8.25	76.42	R610W610	5.25	81.25
R1050W1050	7.50	77.50	R1400W1400	5.80	80.40	R1880W1880	6.00	79.83	R620W620	5.80	80.60
R1060W1060	6.83	78.67	R1410W1410	4.13	83.38	R1890W1890	5.25	81.00	R630W630	8.33	76.19
R1070W1070	7.43	77.71	R1420W1420	6.25	79.75	R190W190	7.00	78.75	R640W640	7.25	78.00
R1080W1080	5.80	80.40	R1430W1430	6.43	79.14	R2000W2000	4.33	82.33	R660W660	7.50	77.50
R1090W1090	6.25	79.75	R1440W1440	6.00	79.83	R200W200	5.25	81.25	R670W670	5.25	81.25
R1100W1100	9.00	75.00	R1450W1450	2.80	85.60	R2060W2060	6.27	78.73	R680W680	5.25	81.25
R1110W1110	6.33	79.50	R1460W1460	5.50	80.67	R2090W2090	7.00	77.00	R690W690	7.80	77.60
R1120W1120	6.67	79.17	R1470W1470	6.40	79.20	R2100W2100	6.00	80.17	R700W700	8.00	77.00
R1130W1130	7.63	77.38	R1480W1480	5.69	80.46	R220W220	7.80	77.60	R710W710	5.80	80.40
R1140W1140	6.72	78.89	R1500W1500	6.00	79.83	R230W230	6.50	79.25	R720W720	6.83	78.67
R1150W1150	7.40	77.80	R1510W1510	6.25	79.75	R240W240	6.83	78.67	R730W730	5.67	80.67
R1160W1160	6.25	79.75	R1520W1520	5.13	81.60	R250W250	4.20	83.00	R760W760	6.40	79.60
R1170W1170	4.00	83.50	R1530W1530	5.50	80.63	R260W260	5.60	81.00	R790W790	6.60	79.00
R1180W1180	6.40	79.20	R1550W1550	6.29	79.43	R300W300	7.20	78.40	R800W800	7.40	77.80
R1190W1190	5.67	80.67	R1560W1560	5.40	80.80	R320W320	6.25	79.75	R810W810	6.83	78.67
R1200W1200	6.14	79.86	R1570W1570	6.00	79.83	R330W330	7.43	77.86	R820W820	5.67	80.67
R120W120	5.67	80.67	R1580W1580	5.73	80.45	R340W340	8.83	75.75	R830W830	6.25	79.75
R1220W1220	7.40	77.80	R1590W1590	5.33	81.33	R350W350	7.80	77.60	R840W840	6.60	79.00
R1230W1230	5.80	80.40	R1600W1600	5.33	81.33	R360W360	7.29	78.00	R850W850	6.60	79.00
R1240W1240	5.80	80.40	R1610W1610	6.00	79.86	R370W370	7.00	78.75	R860W860	6.25	79.75
R1250W1250	7.40	77.80	R1620W1620	6.00	80.25	R380W380	5.25	81.25	R870W870	7.00	78.38
R1260W1260	6.29	79.43	R1630W1630	5.60	80.40	R400W400	7.00	78.75	R890W890	6.25	79.75
R1270W1270	6.90	78.60	R1650W1650	5.83	80.33	R410W410	5.67	80.67	R900W900	6.25	79.75
R1280W1280	6.80	78.80	R1660W1660	5.40	80.80	R430W430	4.25	83.00	R940W940	6.25	79.75
R1290W1290	6.25	79.75	R1670W1670	5.40	80.80	R450W450	5.60	81.00	R950W950	5.67	80.67
R1300W1300	6.40	79.20	R1680W1680	6.40	79.20	R470W470	4.20	83.00	R960W960	5.17	81.50
R130W130	5.67	80.67	R1690W1690	6.00	79.83	R480W480	7.33	78.33	R970W970	6.25	79.75
R1310W1310	7.40	77.80	R170W170	7.33	78.33	R500W500	8.67	76.00	R980W980	7.17	78.17
R1320W1320	6.40	79.20	R1710W1710	6.00	79.83	R520W520	8.00	77.00	R990W990	7.05	78.35
R1330W1330	6.00	79.86	R1720W1720	2.69	85.69	R530W530	5.67	80.67			
R1340W1340	6.00	79.83	R1750W1750	5.33	81.33	R550W550	8.00	77.17			

# 10

**VALORES PONDERADOS DE S Y CN INGRESADOS AL MODELO GEOMÉTRICO DEL ÁREA DE ESTUDIO PARA LA GENERACIÓN DEL *ESCENARIO DOS*. LOS VALORES DE PERIODO DE RETARDO (*tp*) Y EL RESTO DE LOS VALORES DE S Y CN PARA LAS DEMÁS SUBUNIDADES PERMANECEN IGUALES.**

Nombre de subunidad	S	CN	Nombre de subunidad	S	CN
R1080W1080	6.67	79.17	R360W360	8.47	76.82
R1110W1110	6.80	78.80	R500W500	11.00	73.00
R1140W1140	6.84	78.74	R630W630	8.43	76.10
R1290W1290	6.40	79.20	R640W640	8.00	77.00
R1400W1400	6.00	79.83	R660W660	9.00	75.00
R1420W1420	7.40	77.80	R700W700	8.33	76.67
R1570W1570	6.40	79.20	R710W710	6.40	79.60
R1580W1580	6.25	79.58	R720W720	7.33	78.00
R1630W1630	6.00	79.83	R790W790	8.33	76.67
R1750W1750	5.75	80.25	R800W800	8.00	77.00
R200W200	7.00	78.33	R830W830	7.20	78.40
R220W220	8.00	77.67	R870W870	9.50	75.33
R260W260	7.00	78.75	R940W940	7.20	78.40
R320W320	8.50	76.25	R950W950	6.50	80.00
R330W330	7.67	77.50	R990W990	7.33	77.90
R340W340	8.85	75.69			