

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS**



**“EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO EN LA  
CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO-CONCHOS, UTILIZANDO UN  
MODELO DE ESCURRIMIENTO”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**PRESENTA**

**OSCAR ALEJANDRO VIRAMONTES OLIVAS**

**ASESOR PRINCIPAL**

**DR. LUIS FERNANDO ESCOBOZA GARCÍA**

**Mexicali, B.C.**

**Mayo 2008**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS**



**“EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO EN LA  
CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO-CONCHOS, UTILIZANDO UN  
MODELO DE ESCURRIMIENTO”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**PRESENTA**

**OSCAR ALEJANDRO VIRAMONTES OLIVAS**

**ASESOR PRINCIPAL**

**DR. LUIS FERNANDO ESCOBOZA GARCÍA**

**Mexicali, B.C.**

**Mayo 2008**

Esta tesis, se realizó bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito para la obtención del grado de:

**Doctor en Ciencias Agropecuarias**

**Consejo Particular**

**Dr. Luis Fernando Escoboza García**  
**Asesor Principal**

**Dr. Jesús Adolfo Román Calleros**  
**Sinodal**

**Dr. Víctor Manuel Reyes Gómez**  
**Sinodal**

**Ph.D. Carmelo Pinedo Álvarez**  
**Sinodal**

**Ph.D. Adolfo Pérez Márquez**  
**Sinodal**

**Mexicali, B.C.**

**Mayo de 2008**

## DEDICATORIA

A Dios, mí Señor, por las oportunidades en la vida.

A María Virgen de Guadalupe, por su intercesión poderosa.

A mí Padre, que desde el Cielo me inspira para seguir creciendo.

A mí Madre, que con sus oraciones me fortalece cada paso en la vida.

A mí Esposa Brenda, por su abnegado apoyo en ésta nueva aventura.

A mí niña Ale y a mí niño Andrés, son dos luceros que iluminan mí sendero.

A mí Abuelo Antonio, su ejemplo y enseñanzas.

A mí Padrino, Pbro. Francisco Porras, por el don de la espiritualidad.

***“Gracias a la Vida que me ha dado tanto...”***

***Violeta Lucero.***

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi agradecimiento al Programa del Mejoramiento al Profesorado (PROMEP), por los recursos aportados para el desarrollo de mis estudios. Al Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, mi Alma Mater, por otorgarme el grado académico. A la Facultad de Zootecnia de la Universidad Autónoma de Chihuahua, por apoyarme siempre en la formación doctoral y al Centro de Investigación Sobre Sequía (CEISS) del instituto de Ecología, A.C. por abrirme las puertas en todo este tiempo.

Agradezco al Dr. Luis Fernando Escoboza, amigo y guía, por su invaluable ayuda durante el desarrollo de mis estudios, ¡muchas gracias! Al Ph.D. Carmelo Pinedo Álvarez, camarada de siempre, por impulsarme permanentemente a lo largo de mi doctorado.

Al Dr. Jesús Adolfo Román Calleros, por estar siempre pendiente en el desarrollo de mis estudios, le estoy infinitamente agradecido, por su amistad, consejos y palabras de aliento. Al amigo Ph.D. Adolfo Pérez Márquez, por su tiempo y apoyo en mi estancia en la ciudad de Mexicali, mil gracias.

Fue un privilegio haber conocido al Dr. Víctor Manuel Reyes Gómez, amigo y consejero, por su paciencia y mano amiga. ¡Gracias!.

Reconozco el apoyo de excelentes personas que mostraron siempre su cooperación para el éxito del presente trabajo, a mis ex alumnas Perla Beatriz Sánchez-Fernández y Nancy Miranda Ojeda, por la importante contribución en el desarrollo del trabajo de campo e investigación; a mis amigos Alfredo Pinedo Álvarez, Juan Manuel Chacón, Octavio Hinojosa de la Garza, Salvador Alcántar Ortega, Jaime Gutiérrez Alderete, Carlos A. Muñoz Robles, Oswaldo Salvador

Ang, Marco Aurelio Guevara y Antonio Chávez Silva, por su importante contribución a este proyecto.

Al profesor Rubén Beltrán Acosta, por su valioso respaldo; al Diputado Federal Carlos Reyes López, por sus gestiones ante PROMEP y a las licenciadas Lucy Jiménez y Araceli Loya González y Mónica Sáenz Vázquez, por el respaldo dado a mis gestiones; a los doctores: Jesús Duarte Mayagoita y Alfredo de la Torre Aranda, excelentes catedráticos, por su apoyo incondicional y amistad.

**Agradezco además, el apoyo de las siguientes instituciones:**

\*Comisión Nacional del Agua, Delegación Chihuahua.

\*Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales, Delegación Chihuahua.

\*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Delegación Chihuahua.

# CONTENIDO

	Página
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	iv
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	xiv
<b>LISTA DE GRÁFICAS</b> .....	xv
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xvii
<b>PRESENTACIÓN</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>OBJETIVOS</b> .....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos.....	5
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	6
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	7
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	8
Antecedentes.....	8
Relevancia de la cuenca del Río Conchos	8
Ciclo Hidrológico.....	8
Factores que Intervienen en el Ciclo del Agua.....	9
Cuencas Hidrográficas.....	10
Procesos Hidrológicos.....	11
Precipitación.....	11
Escurrimiento.....	12

Infiltración.....	14
Evaporación.....	15
Transpiración.....	16
Movimiento del Agua en el Suelo.....	16
Conductividad hidráulica ( $K_h$ ).....	17
Producción de sedimentos.....	18
Encostramiento.....	20
Consideraciones sobre el Funcionamiento Físico del Suelo.....	21
Densidad del suelo.....	21
Densidad aparente.....	21
Densidad real.....	21
Porosidad total (PT).....	21
Humedad edáfica.....	21
Materia orgánica (MO).....	22
Morfometría de una Cuenca.....	22
Modelación Hidrológica en Cuencas.....	23
Antecedentes de los Modelos Hidrológicos.....	24
Importancia de los modelos hidrológicos	25
Ventajas y Desventajas de los Modelos Hidrológicos.....	27
Calibración y Validación de los Modelos.....	29
Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las Cuencas.....	29
Relación de SIG con Modelos Hidrológicos.....	30

Modelos Digitales de Elevación (MDE).....	32
Método Racional.....	32
<b>CONCLUSIÓN.....</b>	<b>35</b>
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>36</b>
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>43</b>
<b>PAPEL HIDROLÓGICO-AMBIENTAL DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO SUPERFICIAL DE LA CUENCA DEL RÍO CONCHOS</b>	
<b>RESUMEN.....</b>	<b>44</b>
<b>ENVIRONMENTAL-HYDROLOGICAL ROLE OF THE HYDRAULICS PROPERTIES OF THE SUPERFICIAL SOIL IN THE WATERSHED OF THE RIVER CONCHOS</b>	
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>46</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>48</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
Descripción del Área de Estudio.....	50
Localización.....	50
Hidrología general.....	50
Clima.....	53
Vegetación.....	55
Geología y geoformas principales.....	57
Metodología.....	60
Aptitudes de infiltración y escurrimiento...	62
Propiedades Hidráulicas del Suelo.....	63
Método Beerkan.....	65

Textura.....	65
Forma de la conductividad hidráulica a Saturación.....	65
Densidad aparente del suelo ( $D_a$ ).....	65
Porosidad total del suelo.....	65
Humedad inicial del suelo ( $\theta_o$ ).....	65
Análisis de la Información.....	70
Tendencia central.....	70
Análisis de componentes principales (ACP).....	71
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>73</b>
Aptitudes de Infiltración y Escurrimiento.....	73
Diferenciación de Grupos Hidrodinámicos de Suelos.....	73
Efecto de la Superficie del Suelo sobre la Infiltración.....	78
Proceso de Infiltración: Suelo con Mantillo y sin Mantillo.....	82
Conductividad Hidráulica.....	85
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>88</b>
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>90</b>
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>93</b>
<b>FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DEL SUELO SUPERFICIAL EN LA CUENCA MEDIA Y BAJA DEL RÍO CONCHOS, CHIHUAHUA</b>	
<b>RESUMEN.....</b>	<b>94</b>

**HYDROLOGICAL FUNCTIONING OF THE SUPERFICIAL  
SOILS IN THE CONCHOS RIVER WATERSHED,  
CHIHUAHUA**

<b>ABSTRACT</b> .....	96
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	97
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	99
Descripción del Área de Estudio.....	99
Metodología.....	101
Textura.....	101
Densidad aparente ( $D_a$ ) y real ( $D_r$ ).....	101
Porosidad.....	101
Pendiente (S).....	101
Estados de superficie.....	101
Aptitudes Hidrodinámicas del Suelo Superficial.....	102
Coeficientes de escurrimiento e Infiltración.....	102
Producción de sedimentos.....	102
Propiedades Hidráulicas del Suelo.....	103
Conductividad hidráulica ( $K_h$ ) por simulación de lluvia.....	103
Método de Beerkan: proceso de infiltración <i>in situ</i> .....	103
Principios físicos de Beerkan.....	103
Análisis de la Información.....	105
<b>RESULTADOS</b> .....	106
Características Físicas del Suelo.....	106

Estados de Superficie del Suelo.....	106
Simulación de Lluvia.....	109
Aptitudes Hidrodinámicas del Suelo.....	112
Evolución de la Infiltración con el Método de BeerKan.....	112
Propiedades Hidráulicas.....	116
Conductividad hidráulica ( <i>Kh</i> ) con lluvia simulada.....	116
Conductividad hidráulica ( <i>Kh</i> ) por BeerKan.....	116
Separación de grupos hidrológicos.....	120
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>126</b>
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>127</b>
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>130</b>
<b>MORFOMETRÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO-CONCHOS, CHIHUAHUA</b>	
<b>RESUMEN.....</b>	<b>131</b>
<b>MORPHOMETRIC OF SAN PEDRO BASIN RIVER-CONCHOS, CHIHUAHUA.</b>	
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>133</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>134</b>
<b>MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>136</b>
Descripción del Área de Estudio.....	136
Metodología.....	136
Coeficiente de Compacidad ( <i>Cc</i> ) o Índice de Gravelius (1914).....	136

Razón de elongación ( <i>Re</i> ).....	139
Factor de forma.....	139
Tamaño de la cuenca.....	140
Parámetros de Relieve.....	140
Curva hipsométrica.....	140
Pendiente media de la cuenca.....	140
Elevación media.....	140
Análisis hipsométrico.....	140
Red de Drenaje.....	142
Densidad de drenaje.....	142
Pendiente media del cauce principal.....	142
Criterio dos de pendiente del cauce principal.....	144
Tiempo de concentración.....	144
Orden de la corriente.....	144
Centro de gravedad del cauce principal.	146
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>147</b>
Área y perímetro.....	147
Parámetros de Forma.....	147
Coeficiente de compacidad ( <i>Cc</i> ).....	149
Razón de elongación.....	149
Factor de forma.....	151
Parámetros de Relieve.....	151
Curva y análisis hipsométrico.....	151

Elevación media.....	151
Pendiente media de la cuenca.....	151
Parámetros Relativos a la Red de Drenaje.....	157
Densidad de drenaje.....	157
Pendiente media del cauce principal....	159
Orden de la corriente.....	159
Tiempo de concentración.....	159
Criterio 2 de pendiente del cauce principal.....	160
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>161</b>
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>162</b>

## LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
<b>PAPEL HIDROLÓGICO-AMBIENTAL DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO SUPERFICIAL DE LA CUENCA DEL RÍO CONCHOS</b>		
1	ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS APTITUDES DE INFILTRACIÓN (KI, %) Y DE ESCURRIMIENTO (KE, %)......	74
<b>FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DEL SUELO SUPERFICIAL EN LA CUENCA MEDIA Y BAJA DEL RÍO CONCHOS, CHIHUAHUA</b>		
2	PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN $gm^{-2}$ / LLUVIA.....	111
3	VARIANZA ACUMULADA EN LOS ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. (ACP).....	121
<b>MORFOMETRÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO-CONCHOS, CHIHUAHUA</b>		
4	FORMAS DE LA CUENCA DE ACUERDO AL ÍNDICE DE COMPACIDAD.....	138
5	CLASIFICACIÓN PROPUESTA PARA EL TAMAÑO DE CUENCAS.....	141
6	VALORES PARA RELIEVE O TOPOGRAFÍA DEL TERRENO.....	145
7	HIPSOMETRÍA EN LA CUENCA SAN PEDRO-CONCHOS, CHIHUAHUA.....	152
9	DATOS PARA LA PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO-CONCHOS, CHIHUAHUA.....	156

## LISTA DE GRÁFICAS

Cuadro		Página
<b>PAPEL HIDROLÓGICO-AMBIENTAL DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO SUPERFICIAL DE LA CUENCA DEL RÍO CONCHOS</b>		
1	Valores medios del coeficiente de infiltración (Ki). Las barras superiores corresponden al valor de la desviación estándar..	75
2	Plano de componentes principales 1 vs 2. Parámetros físicos e hidrodinámicos del suelo superficial en la parte media y alta de la cuenca del Río Conchos.....	77
3	Relación promedio de los estados de superficie del suelo con mantillo y suelos encostrados o con grava.....	80
4	Promedio de las aptitudes de infiltración en sitios de estudio, separando suelo cubierto con mantillo y desprovisto de él, en los sitios 1, 2 y 3.....	81
5	Evolución de la infiltración (método Beerkan). C1- C15, número de repeticiones por sitio. Las curvas sólidas son los ajustes para obtención de $\alpha_1$ y $\alpha_2$ .....	83
6	Valores de la conductividad hidráulica en cada uno de los 15 puntos de repetición en los cinco sitios de estudio.....	86
<b>FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DEL SUELO SUPERFICIAL EN LA CUENCA MEDIA Y BAJA DEL RÍO CONCHOS, CHIHUAHUA</b>		
7	Valores promedio y desviación estándar de características físicas del suelo.....	107
8	Porcentaje de los estados de superficie en la cuenca media y baja del río Conchos.....	108
9	Ejemplos de hidrográmas –tipo- del escurrimiento.....	110
10	Aptitudes de escurrimiento en suelo seco y húmedo en los tres sitios de estudio en la cuenca del Río Conchos.....	113
11	Curvas de infiltración obtenidas por Beerkan.....	114

12	Conductividad hidráulica con lluvia simulada para los tres sitios estudio en la cuenca del Río Conchos.....	117
13	Conductividad hidráulica con el Método de Beerkan, en los sitios de estudio. a) Río Chico, b) El Morrión, c) El Pueblito en la cuenca del Río Conchos.....	118
14	Plano de componentes 1 y 3 en la cuenca media del Río Conchos.....	122
15	Plano de componentes 1 y 2 en la cuenca baja en la cuenca del Río Conchos.....	124
16	Plano de componentes 1 y 2 en las cuencas media y baja del Río Conchos.....	125
<b>MORFOMETRÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO-CONCHOS, CHIHUAHUA.</b>		
17	Distribución del análisis hipsométrico, cuenca San del Río San Pedro-Conchos, Chihuahua.....	155

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
<b>PAPEL HIDROLÓGICO-AMBIENTAL DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO SUPERFICIAL DE LA CUENCA DEL RÍO CONCHOS</b>		
1	Representación del área general de estudio (cuenca del Río Conchos, Chihuahua).....	51
2	División de la cuenca del Río Conchos.....	52
3	Principales presas en la cuenca del Conchos, Chihuahua.....	54
4	Distribución de climas en la cuenca del Río Conchos, Chihuahua.....	56
5	Distribución vegetativa de la Cuenca del Río Conchos.....	58
6	Distribución edáfica en la Cuenca del Río Conchos, Chihuahua.....	59
7	Localización de los sitios de estudio en la parte alta y media del Río Conchos, Chihuahua.....	61
8	Diagrama de la experiencia <i>in situ</i> del Método Beerkan para obtener la Conductividad Hidráulica del suelo.....	67
<b>FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DEL SUELO SUPERFICIAL EN LA CUENCA MEDIA Y BAJA DEL RÍO CONCHOS, CHIHUAHUA</b>		
9	Ubicación de los sitios de estudio en la cuenca media y baja del Río Conchos (puntos negros en el mapa), Chihuahua.....	100
<b>MORFOMETRÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO-CONCHOS, CHIHUAHUA.</b>		
10	Localización de la subcuenca San Pedro, Conchos.....	137
11	Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión.....	143
12	Morfometría del Modelo Digital de Elevación en 3d que representa la cuenca del Río San Pedro-Conchos.....	148

13	Forma oval-oblonga a rectangular de la cuenca San Pedro, Conchos, Chihuahua.....	150
14	Curvas de nivel de la cuenca San Pedro, Conchos, Chihuahua.....	153
15	Distribución de los cauces secundarios y punto medio del cauce principal en la cuenca del Río San Pedro Conchos.....	158

**Universidad Autónoma de Baja California  
Instituto de Ciencias Agrícolas**

**Centro de Investigación y Posgrado en Ciencias Agropecuarias  
Programa Doctoral en Ciencias Agropecuarias**

**DISERTACIÓN**

**“Evaluación del Funcionamiento Hidrológico en la Cuenca del Río San Pedro-Conchos, Utilizando un Modelo de Escurrimiento”**

**Oscar Alejandro Viramontes Olivas**

**PRESENTACIÓN**

El presente trabajo, está compuesto de cinco capítulos, organizados en forma de artículos científicos:

**Capítulo uno.** Comprende el análisis crítico de conocimientos científicos básicos, sobre procesos hidrográficos que intervienen en el ciclo del agua en cuencas hidrológicas, así como las leyes físicas que gobiernan el movimiento superficial del vital líquido sobre el suelo y su funcionamiento hidrológico.

Al final de este segmento, se presentan las bases teóricas sobre procesos físicos del suelo y los antecedentes relativos a los modelos hidrológicos.

**Capítulo dos y tres.** Contiene los resultados del estudio experimental que sirvió para determinar las aptitudes hidrodinámicas del suelo superficial de la cuenca del Río Conchos. Se describen a detalle, las metodologías de simulación de lluvia y el método de infiltración controlada de Beerkan, que sirvieron para poner en evidencia el papel hidrológico ambiental de la interfase lluvia-suelo-vegetación-escurrimiento-infiltración.

En estos artículos, se presentan los rangos de los coeficientes de escurrimiento de los principales estados de superficie del suelo en la cuenca alta, media y baja del Río Conchos, Chihuahua.

**Capítulo cuatro.** Se presenta, la caracterización de la cuenca del Río San Pedro-Conchos, donde se describen los parámetros de forma de relieve que tienen inferencia en el funcionamiento hidrológico del sistema.

**Capítulo cinco.** Se expone, un avance de la validación del SIG sobre el Método Racional de estimación de escorrentías anuales en la cuenca del Río San Pedro-Conchos, Chihuahua, construido a través de la herramienta geoespacial.

Finalmente, se presentan las conclusiones de la investigación y algunas perspectivas a desarrollar en un futuro inmediato.

## INTRODUCCIÓN

Históricamente, la precipitación de agua sobre una cuenca hidrológica representa un elemento indispensable en el desarrollo de los pueblos, además. De igual forma, se ha convertido en limitante en regiones áridas y semi-áridas como lo es la cuenca del Río Conchos, que produce recursos hídricos imprescindibles para el desarrollo del estado de Chihuahua, siendo así, la más importante en el norte de México (INEGI, 1999).

El principal río de la región, el Conchos, nace en la Sierra Madre Occidental en el municipio de Bocoyna, en la parte alta, recorriendo valles centrales y agrícolas en su parte media y terminando en la porción baja donde se une al Río Bravo cerca del Parque Nacional del Big Bend y del área protegida del Cañón de Santa Elena. Todo ello, representa una fuente de vida para el clima extremoso del Estado que lo hace más vulnerable a la incidencia de sequías.

El dinamismo social y económico de la zona con 1.3 millones de habitantes, generó mayor demanda de agua, siendo la agricultura la actividad con mayor consumo con 90 % (CNA, 2001a). Asimismo, el agua del Río Conchos, también ha sido utilizada para el pago de la deuda contraída de México de agua con Estados Unidos, a partir del Tratado sobre Distribución de Aguas Internacionales del 3 de febrero de 1944, suministrando además éste recurso a los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, ya en corrientes del Río Bravo (Rodríguez, 2002). La deforestación, desecación, el sobre pastoreo y la consecuente erosión del suelo, afectaron al deterioro de bastas

zonas de la cuenca, conduciendo a menor captación de agua de lluvia por la degradación de la cubierta vegetal, agregándose otros problemas, como la contaminación con agroquímicos, descarga de desechos sólidos y aguas urbanas e industriales al río, que han puesto en peligro de extinción a numerosos endemismos de sus aguas.

En la cuenca del Río Conchos, la información generada ha sido bien documentada, planteado la necesidad de rescatarla y protegerla, cuidando y monitoreando los recursos naturales, principalmente el hídrico. Murillo (2002) establece, la importancia de contar con herramientas matemáticas e informáticas que permitan predecir con precisión los volúmenes de escurrimiento a escala de cuenca, con el propósito de tener una mejor planeación en el uso del agua que dependerá del buen estado de otros recursos, como es el bosque y el pastizal.

Modelos simples como el Método Racional (Lloyd-George, 1906) permite determinar el caudal máximo de escurrimiento en una determinada sección de la red de drenaje de una cuenca, bajo el supuesto que éste acontecerá para una lluvia de intensidad media máxima constante. De acuerdo con Treviño *et al.* (2002) el Método Racional, requiere como variables de entrada la intensidad de lámina para el tiempo de concentración de la cuenca, el área de captación y el coeficiente de esorrentía.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General.**

Evaluar las propiedades hidráulicas del suelo superficial de la cuenca alta, media y baja del Río Conchos, con el propósito de adaptar un modelo de predicción de la escorrentía anual, particularmente en la cuenca del Río San Pedro-Conchos, Chihuahua.

### **Objetivos Específicos.**

Evaluar las aptitudes de infiltración y escurrimiento en sitios experimentales representativos de la cuenca alta, media y baja del Río Conchos, con el propósito de estimar rangos extremos del coeficiente de escurrimiento.

Analizar el papel hidrológico ambiental del suelo superficial en la cuenca media y baja del Río Conchos.

Reconstruir los parámetros morfométricos de la cuenca del Río San Pedro-Conchos, relacionados con el funcionamiento hidrológico.

Desarrollar a partir de tecnología geoespacial, el cálculo del volumen de escorrentía media anual para la cuenca del Río San Pedro-Conchos, con el Método Racional Modificado.

## LITERATURA CITADA

- CNA. 2001a. Comisión de Cuenca del Río Conchos. Diagnóstico Versión 1.0 Gerencia Estatal Chihuahua, Chihuahua, México: 36-37 p.
- INEGI. 1999. Estudio hidrológico del estado de Chihuahua. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Inform y Gobierno del Estado de Chihuahua. 1ª Edición, México. 244 p.
- Murillo, S. 2002. Estudio del efecto del cambio de uso de suelo en el escurrimiento en la Subcuenca 24bf Monterrey, aplicando un sistema de Información geográfica. Tesis, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey. 10-12 p.
- Rodríguez, J.A. 2002. La cuenca del río Bravo y el Tratado Internacional de Aguas de 1944. Comisión Nacional del Agua. 14-18 p.
- Treviño, E. J., C. A. Muñoz R., C. Cavazos C. y L. Barajas Chávez. 2002. Evaluación del flujo hídrico superficial en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas. Ciencia Universidad Autónoma de Nuevo León, México. 5: 525-530 p.

## **CAPÍTULO 1**

En la primer parte, se hace una revisión bibliográfica general de los temas que se abordarán a lo largo de la investigación, contenida en cinco secciones, cuatro, son artículos redactados a partir de experimentaciones de campo y enviados a revistas científicas arbitradas, de los cuales, ya están aceptados y publicados en las revistas: Latinoamericana de Recursos Naturales, de la Universidad de Sonora; Tecnociencia, de la Universidad Autónoma de Chihuahua; Ingeniería Hidráulica en México, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y la Revista Ciencia, de la Universidad de Nuevo León.

En el capítulo uno, se hace referencia a la importancia que tienen las cuencas consideradas como unidades fundamental dentro del ciclo hidrológico del agua. También, se lleva a cabo una explicación amplia de las condiciones físicas y funcionamiento del suelo en relación con la conservación de los recursos naturales y cómo éstos, influyen en el aumento de los escurrimientos y en la producción de sedimentos.

Finalmente, se reconoce la importancia de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), como herramienta geoespacial utilizada en la modelación de escenarios, bajo diferentes condiciones de manejo dentro de las cuencas hidrográficas, tomando como base, diferentes variables y parámetros que influyen directamente en el funcionamiento natural de una determinada área.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### **Antecedentes.**

**Relevancia de la cuenca del Río Conchos.** Representa la fuente de agua más importante para las diferentes actividades agropecuarias, urbanas e industriales en el estado de Chihuahua, su cauce principal, atraviesa gran parte de la entidad, desde la Sierra Tarahumara, hasta el Río Bravo en el municipio de Ojinaga (CNA, 2001a). Actualmente, la región enfrenta una problemática compleja debido a diversas acciones antropogénicas como la deforestación (parte alta); el sobre-pastoreo (cuenca media); sobreexplotación de acuíferos (parte baja); contaminación y cambios de uso del suelo en toda la rivera del Conchos. En este sentido, es importante conocer la función hidrodinámica de las corrientes de aguas superficiales y contribuir así, en el manejo y mejoramiento de la zona, prioritaria para el estado de Chihuahua (Miranda 2006).

### **Ciclo Hidrológico.**

Aparicio (1999) menciona, que la circulación general del agua de los océanos hacia la atmósfera; de la formación nubosa a la precipitación; del escurrimiento hacia los lagos y ríos con destino a los mares; de la infiltración al subsuelo, de la evaporación hasta llegar nuevamente a condensarse en el cielo, constituye el ciclo hidrológico.

Cuando cae lluvia sobre la superficie del suelo, parte del agua es retenida temporalmente en depresiones superficiales del terreno por la vegetación y por objetos de intercepción como piedras y mantillo. No obstante,

el agua infiltrada, puede percolar hasta zonas más profundas o ser almacenada subterráneamente y fluir como manantiales ó incorporarse a los ríos, lagos o mares.

El agua no permanece estática, forma parte de un proceso dinámico de circulación entre los océanos, la atmósfera y la litosfera-biosfera de forma permanente (Chow *et al.*, 2000). Además, la cantidad de agua que fluye debido al fenómeno de sublimación es insignificante con relación al movimiento por procesos físicos como la evapotranspiración.

Nanía (2003) menciona, que el 97.5 % del agua del planeta se encuentra en los océanos ( $1.3 \times 10^9 \text{ km}^3$ ); 3 % ( $2.2 \times 10^7 \text{ km}^3$ ), se distribuye en zonas polares, ríos, lagos y en el subsuelo. Las cifras anteriores, muestran que el recurso agua no es un elemento escaso en si, el problema está, que no siempre se encuentra disponible en el lugar oportuno.

### **Factores que Intervienen en el Ciclo del Agua.**

Esta dinámica cíclica está condicionada por factores como el viento, la cantidad e intensidad de la precipitación efectiva (a mayor intensidad, el impacto será superior sobre la superficie edáfica y menor su infiltración) debido a la rápida saturación de los poros en el suelo que dependerán de las características físicas del lugar donde ocurre la precipitación (Treviño *et al.*, 2002).

Treviño *et al.* (2005) indican, que actualmente el ciclo del agua es alterado por fenómenos macro y micro climáticos causados en gran medida por la acción del hombre. La remoción de la cubierta vegetal para ser transformada en sistemas de producción rentables, ha causando alteraciones en el flujo y en

los procesos de evaporación del agua afectando la calidad y cantidad del vital líquido en las cuencas hidrográficas, las cuales, además de ser unidades de captación, deben de ser consideradas como unidades de manejo para los recursos naturales asociados.

### **Cuencas Hidrográficas.**

Cotler *et al.* (2007) la definen como, la unidad monográfica superficial delimitada por divisorias (“parteaguas”) de estas escurren aguas superficiales y donde las precipitaciones pluviales tienden a ser drenadas hacia un mismo origen. Al interior, las cuencas son divididas por Campos (1992) en pequeñas, medianas, grandes y muy grandes y son diferenciadas con base a sus características funcionales (cabecera-captación y transporte-emisión) ó por su nivel altitudinal (cuenca alta, media y baja). Asimismo, son de tipo exorreicas cuyas escorrentías superficiales van al mar; endorreicas, drenan a un cuerpo de agua interior y las arreicas, se caracterizan por presentar un drenaje superficial que se infiltra antes de encontrar un cuerpo colector.

Maldonado *et al.* (2001) se refieren a las cuencas hidrográficas como unidades territoriales donde funciona la combinación de un sistema hídrico que produce agua, simultáneamente con un subsistema económico y social, el capital, trabajo y tecnología. En ellas, se producen bienes y servicios agrícolas, pecuarios, forestales y recreativos que demandan las poblaciones localizadas aguas abajo.

Rubio y Llorens (2003) indican, que las cuencas son las principales formas terrestres dentro del ciclo hidrológico que captan y concentran la oferta del agua que proviene de la precipitación. La cuenca es además, el área donde

existe la interacción del agua en un proceso permanente y dinámico con los sistemas físicos (recursos naturales), bióticos (flora y fauna) y socioeconómicos (formados por usuarios de las cuencas y sus interacciones).

Álvarez-Cobelas y Angeker (2007) asumen que las cuencas hidrográficas son cauces fluviales que pueden estar funcionando como aparato “excretor” de elementos químicos presentes en organismos, la atmósfera, el agua y los suelos de las cuencas. La presencia de estos elementos en el agua fluvial, es un indicador de cómo los factores ambientales que actúan sobre las cuencas hidrográficas, incluyendo los antropogénicos, inciden en la retención o exportación de productos y organismos.

Al respecto, Nanía (2003) menciona que las características físicas de una cuenca, dependen de la morfología (forma, relieve, red de drenaje), los tipos de suelo, cubierta vegetal, la geología, usos del suelo, los que influyen de manera decisiva en la respuesta hidrológica de la misma.

### **Procesos Hidrológicos.**

**Precipitación.** La mayor parte de las precipitaciones a escala mundial, ocurren sobre el mar. Dependiendo de las condiciones climáticas, estas se abaten sobre la tierra en forma de lluvia, nieve, humedad de niebla, granizo o escarcha (los dos últimos no son de mucha importancia con respecto al volumen de agua que precipita). Las lluvias que caen en forma de humedad de niebla, son importantes en zonas climáticas desérticas o semidesérticas (Quezada, 1989).

Escalante-Sandoval (2007) menciona, que la precipitación es medida con pluviómetros y se expresa en altura o lámina de agua precipitada, de tal manera, que 1 mm de lluvia que cae sobre 1 m<sup>2</sup>, representa 1 l de agua. Estos

datos, son fundamentales en la estimación del ciclo hidrológico, ya que permiten calcular la cantidad de agua captada por unidad de superficie. Cotler *et al.* (2007) indican que otro de los instrumentos de medición son los pluviógrafos y pluviómetros digitales, que permiten considerar la variable tiempo y a su vez, estimar la intensidad de lluvia, característica importante desde el punto de vista de erosión del suelo y la producción de escurrimientos. Sin embargo, medir la precipitación, es común, pero presenta diferencias respecto a las cantidades que el suelo intercepta a partir de la vegetación, siendo hasta 40 % de la cantidad pluvial que fluye por los troncos, según la intensidad del viento (Escalante-Sandoval, 2007).

**Escurrimiento.** Definido por Viramontes *et al.* (2006) como el movimiento superficial del agua en el suelo y dependerá de las características físicas (capacidad de campo, textura, % de saturación, porosidad, contenido de materia orgánica, conductividad hidráulica y otros) pudiendo ser modificadas por las actividades humanas como el sobre pastoreo, labranza y deforestación que modifican el comportamiento hidráulico de los suelos (Álvarez-Cobelas y Angeler, 2007).

Está bien documentada, la importancia que tiene la Sierra Madre Occidental como fuente de agua para el Centro-Oeste y Norte de México y por la producción ganadera y la explotación del bosque que se da en la región. Aquí también, se genera la mayor parte de los escurrimientos que llegan al Río Bravo provenientes de la cuenca del Río Conchos, destacando su importancia hidrológica y estratégica nacional (Descroix *et al.*, 2001).

Tapia *et al.* (2002) indican, que más del 60 % de los recursos hídricos y de suelo en el país, se encuentran degradados en situación de moderada a severa. Desde 1960, los bosques templados y tropicales en México, se redujeron de 30 y 75 %, respectivamente. La erosión edáfica causada por la deforestación, se ha identificado como una de las principales causas del deterioro de las cuencas y la República Mexicana, ocupa el tercer lugar entre los países con mayores tasas de deforestación (World Water Resources Institute, 1994).

Murillo *et al.* (2002) mencionan, que el escurrimiento se presenta cuando la intensidad pluvial excede la capacidad de retención de humedad del suelo, asociados con las condiciones edáficas y basadas en factores que pueden degradarla como el sobre pastoreo, cambio de uso de suelo, la agricultura convencional que ha modificado el equilibrio hidrológico, conduciendo a una mayor pérdida de partículas superficiales, disminuyendo la productividad del suelo e incrementando la erosión y el azolve en lagos, ríos y presas (Tapia *et al.*, 2002).

Sánchez *et al.* (2005) establecen una relación estrecha entre el escurrimiento superficial y la velocidad de infiltración del suelo, la capacidad de almacenamiento del agua y la distribución de la intensidad de lluvia durante una tormenta. Bajo condiciones normales, el escurrimiento se genera cuando la intensidad de lluvia es mayor que la velocidad de infiltración edáfica, conduciendo esto al desprendimiento y transporte de partículas sólidas; a ésta acción el suelo responde con una resistencia en función del nivel de sus propiedades físicas (Sáenz, 1999).

**Infiltración.** Proceso mediante el cual, el agua penetra en el suelo a través de aberturas y poros de tamaño variable en sentido vertical descendente. La tasa de infiltración, se define como el flujo de agua por unidad de tiempo que penetra desde la superficie del suelo (Sánchez *et al.*, 2005). En condiciones naturales, la infiltración depende de: las características intrínsecas del medio (porosidad y granulometría) y de fuerzas derivadas de la gravedad y la presión capilar asociadas al avance del frente de humedad en los horizontes inferiores.

Esta compleja representación física, está definida por la ecuación de Richards (1931) que la combina con la de continuidad de la ley de Darcy, bajo la suposición de que la relación lineal entre la densidad del flujo de masa y el gradiente hidráulico permanece válida para flujos no saturados.

Sin embargo, el suelo es generalmente heterogéneo y las diferencias texturales y de permeabilidad, son sustanciales entre los estratos, lo que provoca un aumento de la incertidumbre sobre los patrones de flujo descritos en la zona insaturada (Nanía, 2003). La respuesta de infiltración estará sujeta a una amplia variabilidad definida por las diferentes combinaciones posibles de cada uno de los condicionantes físicos y no físicos del proceso, generando incertidumbre en su predicción y posterior relación con la variación de humedad en el suelo.

Rubio y Llorens (2003) indican, que la obtención de datos de campo sobre infiltración ofrecen ventajas respecto a la aplicabilidad de esquemas conceptuales ó de laboratorio; sin embargo su interpretación es compleja. Sí el objetivo a determinar es el proceso en sí, los datos reflejarán la variabilidad del fenómeno para un área específica en relación a todos los parámetros que lo

controlan, permitiendo la búsqueda de relaciones significativas entre ellos en un contexto real (Návar y Synnott, 2000).

Por último, Corradini *et al.* (2000) exponen que la infiltración se presenta como uno de los fenómenos que definen la variabilidad del contenido de humedad del suelo y determinan la entrada al sistema suelo-planta, disponible para el desarrollo vegetativo. La humedad del suelo, por sí sola, es capaz de modificar las propiedades físicas del medio y, por tanto, de alterar el comportamiento de la infiltración. Así, su respuesta estará sujeta a una amplia variabilidad definida por las diferentes combinaciones posibles de cada uno de las condicionantes físicos y no físicos del proceso, llegando a generar una elevada incertidumbre en su predicción y posterior relación con la variación de la humedad del suelo (Sánchez, 2006).

**Evaporación.** Miranda (2006) menciona, que la evaporación es una de las variables hidrológicas importantes al momento de establecer el balance hídrico de una determinada cuenca hidrográfica o parte de esta. En este caso, se debe distinguir entre la evaporación desde superficies libres y la evaporación desde el suelo. Por su parte, Sánchez (2006) la define como un proceso físico que consiste en el pasaje lento y gradual de un estado líquido hacia un estado más o menos gaseoso, en función de un aumento natural o artificial de la temperatura, lo que produce influencia en el movimiento de las moléculas, agitándolas. Con la intensificación del desplazamiento, las partículas escapan hacia la atmósfera transformándose, consecuentemente, en vapor.

La tasa de evaporación de la superficie del suelo húmedo y desnudo, es determinada por factores meteorológicos y en particular por la energía

disponible para cambiar el agua líquida en vapor. En estas condiciones, la evaporación es determinada por el proceso atmosférico o por la rapidez del movimiento del agua hacia la superficie del suelo (Nanía, 2003).

**Transpiración.** Del total del agua absorbida por el sistema radicular de una planta, solo una porción de esta, permanece en los tejidos de la misma; virtualmente, el total del agua retorna a la atmósfera en forma de vapor por transpiración. Este proceso es importante como mecanismo principal por el cual, el agua precipitada sobre la superficie de la tierra regresa hacia la atmósfera (Miranda, 2006).

Es difícil estudiar el balance hídrico de una cuenca hidrográfica, separando la evaporación y transpiración, por ello, la mayoría de los estudios contemplan a los dos fenómenos físicos en conjunto (Sánchez *et al*, 2005).

### **Movimiento del Agua en el Suelo.**

El movimiento del agua a través del perfil del suelo, es dominado por las características físicas del sistema edáfico (Hillel, 1980). El flujo de agua es gobernado por diferentes factores: el gravitacional, el capilar y el hidráulico. En un suelo no saturado, el movimiento del agua está dado por la conductividad hidráulica y la sortividad (Chong *et al.*, 1981) como el agua sólo se trasmite a través de poros, la velocidad del flujo que circula es directamente proporcional al diámetro de los mismos. A parte del efecto geométrico, es aún en mayor grado para los poros pequeños debido a que la movilidad de las moléculas de agua unidas a las partículas sólidas es muy baja por los efectos de adsorción (Znag, 1997).

Como conclusión, Hillel (1980) menciona que las condiciones de

saturación completa ó parcial en suelos de textura gruesa, presentan mayor conductividad hidráulica, como consecuencia del tamaño de los poros que permiten mayor transmisividad del agua.

**Conductividad hidráulica ( $K_h$ ).** Es un parámetro esencial en la determinación cuantitativa del movimiento del agua en el suelo, la cual, es afectada por la textura y estructura del suelo, siendo mayor en superficies altamente porosas, fracturadas ó agregadas y menor en suelos densos y compactados, así como por el exceso de sodio ( $\text{Na}^+$ ) presente ó adicionado en el suelo (Chirinos, 1999). Por su parte Auki y Sereno (2005) mencionan que la  $K_h$  es la habilidad del suelo para conducir agua bajo un gradiente de potencial hidráulico, no obstante, la determinación experimental de este parámetro, no resulta fácil; por esta razón, se realizan numerosos intentos para representarla mediante ecuaciones paramétricas sencillas.

Lin *et al.* (1996) indican, que cuando una fuente de agua se pone en contacto con la superficie del suelo, las etapas iniciales del movimiento de esta hacia el interior del perfil son dominadas por las propiedades capilares del mismo. Bajo condiciones estacionarias, el flujo de agua es dominado por un factor gravitacional, uno de capilaridad del suelo y otro hidráulico.

Dafonte *et al.* (2003) reconocen, que la  $K_h$ , es un factor importante que afecta la infiltración de agua en el suelo con frecuencia y es necesario como parámetro de entrada en los modelos hidrológicos. Además, es un parámetro clave para analizar o modelar el flujo de agua y sustancias químicas del suelo.

La variabilidad espacial de la  $K_h$  del suelo debe considerarse en los

modelos hidrológicos distribuidos, debiendo representar correctamente el comportamiento de la infiltración y la generación de escorrentía de origen superficial ó subsuperficial dentro de una cuenca de drenaje (Auki y Sereno, 2005).

Algunas propiedades hidráulicas del suelo, de mayor impacto, que permiten cuantificar el tamaño, la distribución y continuidad de la red de poros, son: la  $K_h$ , a saturación, la relación entre el potencial métrico, contenido hídrico y la sortividad edáfica que es una medida de la habilidad que tiene un suelo de absorber agua durante el proceso de la humectación; estas propiedades son necesarias en estudios de erosión, balance hídrico y producción vegetal (Sánchez *et al.*, 2005)

La  $K_h$  puede mostrar una correlación alta con las variables topográficas, sobre todo en una cuenca, debido a que la topografía tiene efectos en los procesos de erosión y deposición de partículas en el desarrollo del perfil y de la estructura del suelo. Las variables topográficas, son de fácil obtención a partir de un modelo de elevación digital, en caso de estar correlacionadas con la  $K_h$  pueden ayudar a mejorar la estimación de la misma utilizando técnicas geoespaciales (Barreto *et al.*, 2003).

**Producción de sedimentos.** En zonas áridas y semiáridas del norte-centro de México, los fenómenos de escurrimiento superficial como erosión hídrica y producción de sedimentos, se atribuyen a las características propias de la lluvia, como las propiedades físicas de los suelos, relacionados con el flujo de agua sobre y dentro de éstos (Sánchez *et al.*, 2005).

La interacción entre las variables anteriores y la modificación de las propiedades del suelo por efectos de la lluvia, determinan aspectos fundamentales relacionados con las pérdidas de lámina y volumen de escurrimiento, tiempo de concentración, tiempo de inicio de escurrimiento y producción de sedimentos (Návar y Synnott, 2000). Por su parte, Tapia *et al.* (2002) definen la producción de sedimentos, como el flujo total de sólidos disueltos y suspendidos en agua de escurrimiento de una cuenca de drenaje durante un tiempo determinado. No toda la pérdida del suelo se deposita en el sistema de las corrientes, puede ocurrir en diversos sitios de la cuenca.

Massobrio *et al.* (1998) menciona que existen diferentes métodos de estimación de producción de sedimentos y nutrimentos asociados; entre los más comunes, consisten en multiplicar la estimación de erosión obtenida a partir de la USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo); sin embargo, el método presenta inconvenientes debido a que el modelo fue elaborado en base a experiencias conducidas en pequeñas parcelas.

Existen otros procedimientos, como el SDR (Sediment Delivery Ratio) que estima la cantidad de suelo erosionado que alcanzan los cuerpos de agua en experimentos de campo, asociado con el monitoreo de sedimentos (Tapia *et al.*, 2000). Por su parte, Návar y Synnott (2000) trabajaron con el modelo paramétrico AGNPS (Agricultural Nonpoint Source Pollution Model), que estima la producción de sedimentos y nutrimentos asociados con tierras agrícolas, generando importante información relacionada con los efectos de la erosión en superficies sobre pastoreadas.

**Encostramiento.** El escurrimiento superficial, se atribuye a la formación de una costra en la parte exterior del suelo, el espesor de esta varía de un milímetro a varios centímetros y se origina por la acción combinada de la energía cinética, que es la caída de la gota de lluvia sobre el suelo y el efecto dispersivo de la precipitación, virtualmente desprovista de electrolitos. Martínez-Gamiño y Walthall (2000a) indican, que la dispersión de agregados en los suelos por factores físicos ó químicos durante el encostramiento ó endurecimiento edáfico, es el resultado de una alteración de la morfología de la superficie del suelo.

La porosidad, distribución del tamaño de las partículas y su orientación, son reportadas como las características morfológicas más afectadas durante la formación de costras (Singer y Warrington, 1991). Este endurecimiento, ocurre como una secuencia de dispersión de partículas edáficas; el uso de acondicionadores del suelo, tales como: yeso fosfórico y polímeros orgánicos, los que se han evaluado en un intento para estabilizar los agregados y prevenir la destrucción de su estructura.

Por su parte Stern *et al.* (1991) mencionan, que el uso de coberturas vegetales u orgánicas son reportadas como un efectivo medio para en la prevención de la dispersión del suelo, causada por el impacto de las lluvias. Este impacto, fue evaluado en términos de parámetros de física de suelos, tales como infiltración, dureza de la costra y emergencia de plantas. Sin embargo, la información disponible no es suficiente en estudios relacionados con en el uso de diferentes prácticas de manejo (Martínez-Gamiño y Walthall, 2000b).

### **Consideraciones sobre el Funcionamiento Físico del Suelo.**

**Densidad del suelo.** Es la cantidad de partículas distribuidas en la estructura edáfica y se encuentra relacionado con la textura. Se distinguen dos tipos: la densidad real ó de partícula, que corresponde a la densidad de la fase sólida del suelo. La densidad aparente, que incluye el volumen de partículas y el vacío de los poros (Miranda, 2006).

**Densidad aparente (*Da*).** Para este trabajo, se dará relevancia a la *Da* la cual permite, evaluar el efecto del manejo que se da al suelo. Además, este indicador, es necesario para referir los datos del análisis de laboratorio a un volumen de suelo en condiciones de campo, por ejemplo, la determinación de la cantidad de materia orgánica, nitrógeno total, cálculo de valores de densidad por suelo, la lámina de agua hasta una profundidad dada y el calculo de la porosidad total.

**Densidad real (*Dr*).** Representa la masa real de un suelo por unidad de volumen, sin considerar el espacio poroso (Sánchez, 2006).

**Porosidad total (*PT*).** Es la relación que existe entre el volumen de huecos o poros conectados entre sí, y el volumen total de una muestra dada. La forma más simple de expresar esa relación de porosidad total, es:

$$PT = 1 - \frac{Dr}{Da}$$

Esta relación, representa el volumen de poros del suelo por donde puede circular el agua dentro del suelo (Findeling, 2001).

**Humedad edáfica.** Indica la cantidad de agua presente en el perfil del suelo a una profundidad específica, estrato u horizonte en un momento determinado. La

humedad edáfica en términos volumétricos es más conveniente para el diagnóstico, debido a que expresa claramente el volumen de suelo ocupado por agua, expresado de otra manera, dos suelos pueden tener la misma humedad gravimétrica. (Reyes-Gómez, 2002).

**Materia orgánica (MO).** La materia orgánica edáfica, formada por restos y productos de descomposición de plantas y animales son activamente descompuestos por la microflora y la micro fauna. No obstante, la mayor cantidad de MO en el suelo, es aportada por hojas, ramas y raíces, ayudando a una mayor retención de la humedad y reducción de la producción de sedimentos (Paul, 1984).

#### **Morfometría de una Cuenca.**

El proceso de caracterización de las propiedades morfométricas de la red de drenaje de una cuenca hidrográfica, es el primer paso en la búsqueda de las relaciones entre estas y las condiciones climáticas, geológicas e hidrológicas que determinan su evolución (Navarrete, 2004). Por su parte, González (2004) sugiere que el comportamiento del caudal y las crecidas dentro de una cuenca, forman un sistema que puede representarse cuantitativamente mediante índices del tamaño, área, longitud, forma, atributos de relieve y la conexión con la red fluvial que son importantes en la respuesta del caudal recibido y que pueden operar tanto, para atenuar, como para intensificar las crecidas.

El volumen de flujo y la velocidad de su movimiento, son razones matemáticas, utilizadas para caracterizar y comparar cuencas de diferentes tamaños (Murillo *et al.*, 2002). El uso de sistemas de información geográfica

(SIG) y de otras herramientas capaces de analizar a partir de modelos digitales de elevación (MDE) las características morfológicas de una cuenca y la red de drenaje, representan una alternativa para manejar, planear y evaluar los recursos naturales de una zona (Pinedo *et al.*, 2007) siendo posible, analizar y simular diversos procesos que ayuden a interpretar el origen y la dinámica de espacios naturales con una precisión razonable a bajo costo y tiempo reducido de operación, con el fin de procesar toda la información (Everitt *et al.*, 2006).

### **Modelación Hidrológica en Cuencas.**

Belmonte y Núñez (2006) definen a los modelos, como la unificación de conceptos relacionados con un ecosistema hidrológicamente funcional que tenga la finalidad de hacer predicciones, simulando las propiedades temporales de un sistema real ó simulado, siendo de forma física, análoga ó digital, utilizándose ecuaciones matemáticas para determinar elementos de flujo del agua subterránea y superficial.

Los modelos son una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física ó matemática, siendo la primera, las relaciones que puedan existir entre el modelo y la realidad que representa, el tipo figurativo ó simbólico; mientras que la segunda, el sistema real está representado por una expresión analítica (Rosano-Méndez *et al.*, 2001).

Tapia *et al.* (2000) mencionan, que los modelos hidrológicos de simulación son una tecnología de predicción basada en procesos de hidrología y erosión; son herramientas valiosas para evaluar el efecto de las prácticas de manejo sobre el ambiente, el escurrimiento, la erosión y la productividad. Los modelos en sistemas agrícolas poseen un marco apropiado para identificar

cambios y tendencias significativas y desarrollar estrategias adecuadas de intervención o manejo alternativo (Domínguez *et al.*, 2005).

Gutiérrez-Carrillo *et al.* (2002) se refieren a los modelos como una serie de parámetros y variables, donde los primeros, describen los componentes geométricos como formas, espesores, áreas, volúmenes ó sus componentes, como transmisibilidad y coeficientes de almacenamiento.

En el caso de las variables, describen la situación del sistema en cada momento y pueden ser: el nivel de precipitación en una región, fluctuación de temperatura, concentraciones de soluto en suelo y otras.

### **Antecedentes de los Modelos Hidrológicos.**

Murillo *et al.* (2002) señalan, que en la actualidad existe una diversidad de modelos, utilizados para analizar procesos hidrológicos en cuencas, sin embargo, el uso se remonta a 1856, cuando se describe la ecuación para el flujo de aguas subterráneas ó Ley de Darcy. Décadas más tarde, se describió el flujo no estable de canal abierto desarrollado a partir de la ecuación de St. Venant.

En 1960, los modelos computacionales empezaron a surgir como una herramienta para recrear escenarios en aguas superficiales y el transporte de sedimentos, tal es el caso del Modelo de Cuencas de Stanford, que representa la respuesta de la totalidad de una cuenca sin tomar en cuenta la caracterización de la variabilidad espacial de una determinada zona, utilizando parámetros que no tienen relación con las características físicas superficiales observables, con la desventaja de la enorme utilización de tiempo para correrlo.

Burnash *et al.* (1973) en Storck *et al.* (2000) mencionan, que los modelos hidrológicos son ampliamente utilizados en Estados Unidos para medir precipitación (Sistema de Predicción Ripario), del Servicio Meteorológico Nacional; el Modelo de Cuantificación de la Humedad del Suelo de Sacramento que es un derivado del Modelo de Cuencas de Standford.

Durante la década de 1970, se desarrollaron modelos para calidad de aguas superficiales y subterráneas; para 1980 para transporte de aguas subterráneas. Finalmente, Karamalegos (2006) indica, que en la actualidad existen diferentes modelos hidrológicos, desde aquellos que son sencillos, hasta los más complejos que requieren una diversidad de variables y parámetros para analizarlos computacionalmente, permitiendo una diversidad de escenarios que apoyan a la investigación tendiente al mejoramiento de los recursos naturales, además de la conservación de las cuencas hidrológicas a través de simulación de escenarios para resolver distintas problemáticas presentes en una determinada zona.

**Importancia de los modelos hidrológicos.** Permiten disponer de indicadores cuantitativos para evaluar el efecto ecológico y económico que tendrán distintas condiciones de manejo sobre las cuencas hidrológicas antes de ser llevados a la práctica. En este sentido, Oropeza (1999) reconoce que los modelos hidrológicos muestran un desarrollo importante en todas las áreas del conocimiento humano, como el estudio de los recursos naturales (hidrología, agricultura, ecología, erosión, planeación y manejo del bosque, biología), astronomía, medicina y otras ciencias, radicando su importancia en buscar y

encontrar respuestas cuantitativas; interpolando, extrapolado, simulando y prediciendo los fenómenos físicos que ocurren en la naturaleza.

Por su parte, Torres *et al.* (2000) coinciden al señalar, que los modelos de simulación son herramientas auxiliares en la investigación que permiten generar datos a partir de variables de interés, para acelerar el procesos en la toma de decisiones ó tener una idea científica de los resultados, ya la modelación, es más que una prueba cuantitativa de una hipótesis, siendo utilizadazas en las ciencias físicas por más de un siglo; sus objetivos, son orientados a la determinación eficiente y precisa de los componentes del ciclo hidrológico en una cuenca y estimar así el comportamiento y la magnitud del agua en diversos escenarios (Herrera *et al.*, 2007).

Las etapas que deben integrarse en un modelo hidrológico, según Lobo *et al.* (2002) son la identificación, calibración, validación y límites de aplicación. En la primera, se definen las variables de interés, la hipótesis y supuestos del modelo en función de sus objetivos y la precisión de los resultados; en el caso de la segunda, se evalúa y estiman los valores del modelo mediante la ayuda de observaciones respecto a los requerimientos de entrada y las respuestas de salida. La validación, compara la respuesta teórica obtenida de la información a través de la imagen (figura, símbolo, ecuación). En este caso, el valor de las entradas y salidas utilizadas deben ser diferentes de aquellas que sean tomados para la calibración del modelo.

Los límites de aplicación son especificados en el marco dentro del cual fue desarrollado el modelo, por ejemplo, los límites físicos y/o analíticos más

allá de los cuales el uso del mismo puede ser adecuado o inadecuado (Herrero y Montero, 1999).

Gelmi y Seoane (2004) mencionan, que una vez aplicado un modelo hidrológico y definido el objetivo del mismo, es imperativo comenzar con su diseño que significa la inclusión de todos los pasos para la selección del código o programa a utilizar, el diseño del modelo (diseño experimental), la calibración, el análisis de sensibilidad y las predicciones del fenómeno bajo estudio.

Maderey-Rascón *et al.* (2000) clasifican en tres grupos los modelos hidrológicos: determinísticos, estadísticos y de sistemas. En el caso del segundo (que se aplicará en esta investigación), son modelos de regresión y correlación, probabilísticos y estocásticos, que permiten desarrollar relaciones numéricas funcionales mediante el tratamiento estadístico de los datos experimentales y los transforman y/o cuantifican en términos de coeficientes de correlación, límites de confianza y pruebas de significancia. En este tipo de modelos, la información utilizada es de forma discreta (variable que describe la naturaleza de la información en términos de elementos individuales en forma de números enteros). La información utilizada para calibración, debe ser independiente del tiempo utilizado inicialmente (Lobo *et al.*, 2002).

### **Ventajas y Desventajas de los Modelos Hidrológicos.**

Herrero *et al.* (2005) destacan las ventajas al trabajar con modelos de simulación, entre las que se cuentan: el poder modificar patrones naturales para analizar diferentes escenarios; determinar las características generales del área en estudio; permiten el mejoramiento del conocimiento de la hidrografía general en zonas a evaluar; permiten calcular espacios alrededor de las cuencas bajo

estudio; predicen impactos relacionados a la hidrología en diferentes escenarios; analizan los daños a los recursos naturales que tienen que ver directamente con los procesos de retención, filtración y escurrimiento de agua; pueden analizar los riesgos ambientales; determinan la dirección de los patrones de flujo de posibles contaminantes; ayudan a entender mejor y visualizar la simulación de diferentes escenarios; en algunos casos la simulación es la única manera de lograr la solución a problemas; los modelos, permiten predecir el comportamiento de los flujos de aguas subterráneas bajo políticas distintas o iguales a los que están sujetos naturalmente y calculan las condiciones de flujo bajo distintos regímenes de extracción, permitiendo, representaciones idealizadas de sistemas compuestos por un conjunto de elementos físicos que interactúan de acuerdo a las leyes que los gobiernan, y que permiten simular su comportamiento (Gutiérrez-Carrillo *et al.*, 2002).

Por su parte, Oropeza (1999) expone algunas desventajas atribuibles al uso de modelos hidrológicos, como: son costosos y requieren tiempo para ser desarrollados y validados; se requieren varias corridas para encontrar una buena solución, aumentando los costos; es difícil revisar si los modelos simulados resultan adecuados al momento de realizarlos, por lo que se requiere en algunos casos, suficiente tiempo para verificar si las simulaciones son correctas.

La solución de un modelo de simulación, es influenciada por el analista. La mayoría de los modelos, requieren cantidad de información y sin garantía que funcionen bien en condiciones diferentes a las utilizadas durante su desarrollo, de ahí, que sea posible la conducción de estudios tendientes a la

validación de éstos, comparando los resultados con datos reales, medidos en estaciones registradoras ubicadas en una cuenca (Finol y Barrios, 1999).

### **Calibración y Validación de los Modelos.**

Torres *et al.* (2005) indican, que definido el objetivo del modelo es necesario comenzar su diseño, incluyendo la selección del código ó programa a utilizar, la calibración, el análisis de sensibilidad y las predicciones; en este sentido, la calibración permite ajustar los datos observados y calculados, mediante el cambio en los valores de los parámetros de mayor influencia aún de aquellos considerados como conocidos.

Para Rosano-Méndez *et al.*, (2001) la validación en un modelo, es la capacidad predictiva, comparando los datos (calculados y observados) con los parámetros determinados en la fase de calibración, en un período diferente. El ajuste entre los datos (observados y calculados) obtenidos durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido durante la calibración, pero es más representativo de la exactitud de predicciones que se hagan con el modelo.

Morales *et al.* (2000) afirman, que el uso de modelos hidrológicos sin previa calibración y validación, conducen a una subestimación de las variables estudiadas. La calibración, permite lograr un ajuste satisfactorio de la dinámica y magnitud entre los datos (observados y medidos), así la capacidad predictiva verdadera de un modelo es mayor a la de un modelo sin previa calibración.

### **Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las Cuencas.**

Los antecedentes de los SIG, datan de varias décadas atrás. Foresman (2006) representan a esta herramienta una tecnología básica, imprescindible y poderosa para capturar, almacenar, manipular y presentar datos espacialmente

referenciados. Además son importantes en el análisis de las cuencas hidrográficas al facilitar la colecta de información; delimita las áreas de estudio; ayudan a visualizar regiones y facilitan el modelamiento y análisis de datos.

Navarrete (2004) destaca, la importancia de los SIG en el estudio de las cuencas en lo específico; en la delimitación de las mismas y en la planeación de proyectos, generando criterios para la localización de una jerarquía hidrográfica a nivel local, regional y nacional. Por su parte, Moreno (2006) menciona, que las unidades de trabajo en los SIG están dadas con la descomposición de la realidad en capas relativas a un ámbito concreto del modelo del territorio a trabajar, dividiéndose en raster y vectorial, caracterizándose el primero, como una unidad espacial estándar, que es el píxel, que permite representar un fragmento espacial.

El vectorial, utiliza las figuras de la geometría convencional, como puntos, líneas, curvas, polígonos, círculos, elipses ó volúmenes para representar las entidades del mundo real.

### **Relación de SIG con Modelos Hidrológicos.**

Carreón *et al.* (2001) consideran que la utilización de la tecnología satelital impacta en todas las áreas del conocimiento, en el caso del monitoreo y evaluación de los recursos naturales, es una herramienta determinante en el manejo, análisis, modelación y despliegue de datos espacialmente referidos y dirigidos a la solución de innumerables problemas de manejo y planeación de los recursos existentes en áreas forestales, agropecuarias y urbanas.

Asimismo, debido a su efecto repetitivo, las imágenes de satélite permiten dar seguimiento a los cambios de uso de suelo y vegetación. Además,

al utilizar los SIG permiten efectuar análisis de datos geográficos de imágenes de satélite, mapas ó información de campo georeferenciada ayudando a monitorear y analizar procesos que influyen en la degradación de los ecosistemas (Eastman, 1999).

Por su parte Storck *et al.* (2000) indican, que los SIG y el estudio hidrológico, cuentan con principios fundamentales que interactúan entre sí, como la descripción del medio ambiente hídrico y la manera de cómo se afectan los aspectos físicos y antropogénicos en el flujo del agua a través del ciclo hidrológico.

Para Herrero *et al.* (2005) el estudio integral de una cuenca y su evolución, implica la ordenación y análisis de gran cantidad de datos espacialmente distribuidos y variables aleatorias en el tiempo. La evolución de los SIG, ha permitido de estos programas, elementos de análisis y consulta de una gran cantidad de procesos. La facultad para gestionar y manipular bases de datos geográficos, permiten desarrollar modelos asociados para el estudio físico, espacial y temporal de diferentes procesos.

Por su parte Moñino (2004) encontró que un modelo integral de una cuenca debe de aglutinar de manera eficiente la utilización de estos modelos definidos por separado, pero simultáneos e indisolubles de la realidad, permitiendo estimar correlaciones con las mediciones reales tomadas en el sistema dentro de su programa de monitorización con datos de campo y permitan, ajustar así el modelo y plantar escenarios futuros, simulando efectos intermedios y finales de cada escenario en cantidad, calidad de agua, entre otros (Treviño *et al.*, 2005).

### **Modelos Digitales de Elevación (MDE).**

Wurbs y James (2002) definen a los MDE como la estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud de una variable cuantitativa, como puede ser: la temperatura, precipitación, humedad y la presión atmosférica. A partir del modelo y la combinación con diferente información SIG, es posible generar mapas de pendiente del terreno, de visibilidad e imágenes en perspectiva. Su proyección, puede ser en unidades UTM (Universal Transversa de Mercator; Datum NAD27 o ITRF92), según lo refiere INEGI (2002).

Los Modelos Digitales del Terreno MDT, son simbólicos, ya que establecen relaciones de correspondencia con el objeto real mediante algoritmos estructurados en programas informáticos como una representación simplificada de un sistema real muy complejo que nos permite predecir el comportamiento de un sistema hidrológico (Moñino, 2004).

### **Método Racional.**

Treviño *et al.* (2005) mencionan, que la estimación del volumen de agua producido a partir del flujo superficial de una cuenca, es necesario para el análisis de los factores que intervienen en la producción del líquido, los que se distribuyen espacialmente a partir del análisis de los SIG, aportando una diversidad de funciones de análisis que permiten simular las diversas variables utilizadas en la estimación de parámetros hidrológicos. Básicamente, el empleo adecuado de dichas funciones, hace posible la implementación de mecanismos efectivos para en la estimación de parámetros de uso frecuente en la clasificación de las cuencas hidrológicas (Torres *et al.*, 2000).

Maldonado *et al.* (2001) señalan que los factores de impacto que influyen en el volumen de agua producto de los escurrimientos en una cuenca, son agroclimáticos, entre ellos se consideran: la cantidad, intensidad y duración de la lluvia; la distribución de la precipitación con respecto del área de la cuenca; la densidad de su red hidrológica y su capacidad de evaluación; las condiciones propias de la superficie del terreno influenciadas por la geología; el tipo de suelo, impermeabilidad; las condiciones de humedad; prácticas de cultivo; intercepción de lluvia por la vegetación; valores de evapotranspiración y la humedad atmosférica, además de otros de carácter fisiográfico (extensión, forma y pendiente media de la cuenca).

Treviño *et al.* (2005) encontraron que el análisis geográfico, permite modelar la cantidad de precipitación interpolando la información proveniente de estaciones meteorológicas. Las técnicas más utilizadas para este fin, consisten, en la creación de matrices de datos obtenidos a partir de modelos de regresión múltiple ó a través de estimaciones climáticas realizadas por interpolación, y calcular así un promedio ponderado, asignando mayor peso a la estación más cercana de acuerdo con el inverso de la distancia al cuadrado (Torres *et al.*, 2000).

Wurbs y James (2002) utilizaron imágenes de satélite para la cartografía de vegetación y la definición en la ocupación del suelo, mostrando uno de los principales campos de percepción remota que permiten, estimar: las superficies ocupadas por tipo de vegetación; la relación existente entre los procesos de deforestación detectadas por esta tecnología, integrando a la vez, datos climáticos; estimar parámetros ambientales como cocientes e índices de

evapotranspiración; medir la cantidad de agua interceptada por la vegetación y los coeficientes de aprovechamiento de agua en diferentes cultivos.

Treviño *et al.* (2002) realizaron estimaciones de la interceptación total de la lluvia para el matorral espinoso y para bosques de clima templado, tomando como base modelos analíticos; de esta manera, el análisis de la información topográfica en forma digital ha sido ampliamente utilizada para la descripción y clasificación de cuencas, permitiendo caracterizar y generar los cursos de drenaje y clasificar los órdenes de las corrientes con base en modelos digitales de elevación.

Otros modelos permiten delimitar las cuencas; caracterizar el relieve para el cálculo de caudales máximos y la red de drenaje. El conocimiento de las variables anteriores y, calculadas con la ecuación presentada por Sáenz (1999) se deriva un coeficiente de escurrimiento ponderado para la cuenca, obtenido a partir de coeficientes de escorrentía generados para cada condición de vegetación, suelo, pendiente y superficie. Una vez obtenido ese coeficiente, se relaciona con la superficie de la cuenca y la precipitación, permitiendo estimar el volumen medio escurrido, punto central de esta investigación.

## CONCLUSIÓN

- 1) La importancia en la conservación de las cuencas hidrológicas como unidades productoras de agua, ha sido un tema relevante en los últimos años, ya que dependen de varias actividades naturales y antropogénicas necesarias para que se desarrollen los ciclos vitales.
- 2) Las necesidades de agua en las zonas desérticas, han aumentado en la medida que las poblaciones crecen, aunado a la falta de promoción de una cultura en educación ambiental.
- 3) La cuenca del Río Conchos, tiene importancia por el suministro de recursos naturales (suelo, fauna, flora y en especial, agua); bajo las difíciles condiciones climáticas, la hace preponderante para el estado de Chihuahua.
- 4) La degradación de los recursos naturales, ponen en peligro la integridad natural de la cuencas, por esto, es necesario realizar estudios que tengan que ver con la conservación del suelo y el mantenimiento de la cubierta vegetal, fundamentales para evitar los escurrimientos y la sedimentación.
- 4) Es necesario mantener en buen estado, la cuenca del Río Conchos, que ayude al aumento de infiltración de agua.
- 5) La utilización de la herramienta geoespacial bajo las condiciones generales de la cuenca, ha sido una alternativa viable, permitiendo hacer diversos trabajos de modelación a partir de la problemática de la zona que nos ayuden a tomar decisiones que favorezcan la preservación de los recursos naturales a futuro.

## LITERATURA CITADA

- Álvarez-Cobelas, M. y D.G. Angeler. 2007. Exportación de nutrientes en las cuencas hidrográficas de Latinoamérica: una recopilación. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. 3 (1): 31-43 p.
- Aparicio, F.J. 1999. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa, México, D.F: 121-126 p.
- Auki, A.M., R. Sereno. 2005. Modificaciones de la conductividad hidráulica y porosidad del suelo estimadas mediante infiltrómetro de disco a tensión. Agricultura Técnica, Chile. 65 (3): 295-305 p.
- Barreto, F.L., H.O. Caravallo y H.R. Ghey. 2003. Conductividad hidráulica en un suelo aluvial en respuesta al porcentaje de sodio intercambiable. Revista Brasileña de Engenharia Agrícola Ambiental. Vol (7): 403-407 p.
- Belmonte, S. y V. Nuñez. 2006. Desarrollo de modelos hidrológicos con herramienta SIG. Internacional Review of Geographical Information Science and Technology. Vol (6): 15-17 p.
- Burnash, R.J.C., R.L. Ferral, and R.A. McGuire. 1973. A generalized streamflow simulation System-Conceptual Modeling for Digital Computers. U.S. National Weather Service. Joint Federal State Forecast Center. Sacramento, C.A. 99-102 p.
- Campos, A. 1992. Proceso del Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 1ª ed. Sal Luis Potosí, México. 22-23 p.
- Carreón, H.E., C. Pinedo y A. Lafón. 2001. Aplicación de la tecnología geoespacial en el estudio de cuencas: Caso río Conchos. XI Congreso Nacional de Irrigación, Simposio 5. Manejo Integral de Cuencas. Guanajuato, Gto, México. 150-155 p.
- Chirinos, I.J. 1999. Variation of hydraulic conductivity on saturated soil in relation to sodium solution concentrations. Rev Fac. Agron, 16: 433-442 p.
- Chong, S. K., R. E. Green, y L. R. Ahuja. 1981. Simple insitu determination of hydraulic conductivity bay power functions description of drainage. Water Resour. Res. (17): 1109-1114 p.
- Chow, V.T., D.R. Maidment y L.W. Mays. 2000. Hidrología aplicada. McGraw-Hill, Bogotá. 110-112 p.

- CNA. 2001a. Comisión de Cuenca del Río Conchos. Diagnóstico Versión 1.0 Gerencia Estatal Chihuahua, Chihuahua, México: 36-37 p.
- Corradini, C., F. Melone and R.E. Smith. 2000. Modeling local infiltration for a two-layered soil under complex rainfall patterns. *Journal of Hydrology*. (237): 58-73 p.
- Cotler, H., Garrido A., R. Mondragón, A. Díaz. 2007. Delimitación de cuencas hidrográficas de México, a escala 1:250,000, INEGI-INE-CONAGUA. Documento técnico. México. 35 p.
- Dafonte, D. J., P. González, T. Castro, R.S. Vieira. 2003. Variabilidad espacial de la conductividad hidráulica saturada de campo medida con Permeámetro Guelph. *Temas de Investigación en Zona no Saturada*. Eds. J.J. López M. Quemada. 121-122 p.
- Descroix, L., D. Viramontes, M. Vauclin, M. González-Barrios, J.L. Esteves. 2001. Influence of surface features and vegetation on runoff and soil erosion in the western Sierra Madre (Durango, North West Mexico). *Catena*, Vol. 43, Num (2): 115-135 p.
- Domínguez, A.A., J.L. Oropeza-Mota, E.V. Palacios y J.S. Garfias. 2005. Study simulated hydrodynamic response in the acambay valley aquifer. *Agrociencia* 39: 246-258 p.
- Eastman, J. R. 1999. *Idrisi 32 guide to GIS and image processing Volume 1*. Clark Labs Clark University. Worcester, Massachusetts, USA. 193 p.
- Eastman, J. R. 1999. *Idrisi 32 guide to GIS and image processing Volume 1*. Clark Labs Clark University. Worcester, Massachusetts, USA. 193 p.
- Escalante-Sandoval, C. 2007. Estimación de lluvias de diseño con distribuciones exponenciadas y exponenciales mezcladas en la Costa de Chiapas. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol (22): Número (4): 103-113 p.
- Everitt, J.H., C. Yang, R.S. Fletcher and D.L. Drawe. 2006. Evaluation of high-resolution satellite imagery for assessing rangeland resources in South Texas. *Rangeland Ecol. Manage.* 59 (4):30-37 p.
- Findeling, A. 2001. Etude de la modelisation de certains effets du semis direct avec pailles de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azote de une culture de maïs pluvial au Mexique. These Docteur Montpellier, Ecole Nationale du Génie Rural de Eaux et Forêts: 355 p.
- Finol, S. y A. Barrios. 1999. Validación del modelo SWRRB en la cuenca del río Guasare, Zulia-Venezuela. *Rev. Forest. Venez.* 43: 17-23 p.

- Foresman, T. 2006. The history of geographic information systems: perspectivas from the pioneers. Upper Saddle River, Prentice Hall. En: Sistemas y análisis de la información geográfica, manual de autoaprendizaje con ArcGis. Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid. Ed. Alfaomega. 13-15 p.
- Gelmi, M.E., R.S. Seoane. 2004. Aplicación de un modelo de calidad de agua y definición de criterios para el monitoreo de un fertilizante en una cuenca rural. Ingeniería del Agua. Vol. 11, No. 4.
- González, M. A. 2004. Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. Boletín de la A.G.E. No. 38. 311-329 p.
- Gutiérrez-Carrillo, N., E.V. Palacios, S.D. Peña, and O.L. Palacios. 2002. Stages for sustainable uses of the Queretaro valley aquifer. Agrociencia 36: 1-10 p.
- Herrera, S.C., A.I. Villalba, M.E. Molinar-Tabares. 2007. Modelación hidrogeológica y evaluación de la sustentabilidad del acuífero transfronterizo del Río San Pedro en Sonora, México. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales. 3 (1): 21-30 p.
- Herrero, J. y O. Montero. 1999. Modelo hidrológico, biológico y de producción para el diseño de vertederos. Manual de usuario y documentación técnica. Grupo de Ingeniería Ambiental. Universidad de Cantabria. 45-48 p.
- Herrero, J.L., M.I. Rodríguez y A.B. Avilés. 2005. Modelos integrales de cuencas hidrográficas y prognosis de escenarios de gestión en SWAT aplicado a la cuenca del Guadalfeo. Grupo de Ríos y Embalses, Universidad de Granada, España. 120-123 p.
- Hillel, D. 1980. Fundamental of Soil Physics. Chap. 8: Flow of water in saturated Soil. AP, San Diego, New York, USA. 5-46 p.
- Karamalegos, M. A. 2006. "Particle size distribution of highway runoff and modification through stormwater treatment." Master Thesis, UT Austin. CRWR online report. 5-10 p.
- Lin, H.S., K.J. Mc Innes, L.P. Wilding and C.T. Hallmark. 1996. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions into a well-structured subsoil. Trans. ASAE 39: 131-133 p.

- Lobo, A., J. Herrero, O. Montero, M. Fantelli y I. Tejero. 2002. "Modeling for environmental assessment of municipal solid waste landfills (Part 1: Hydrology)". *Waste Management and Research*, 20(2): 198 – 210 p.
- Maderey-Rascón, L.E., F.C. Navarro y L.C. Godínez. 2000. Relationship between the watery phenomena and the main thermic elements in México. *Agrociencia* 35: 23-40 p.
- Maldonado de León, O.A., O.L. Palacios, J.L. Oporeza, R. G Springall y D.S. Fernández. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia* 35 (3). 335-345 p.
- Maldonado de León, O.A., O.L. Palacios, J.L. Oporeza, R. G Springall y D.S. Fernández. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia* 35 (3). 335-345 p.
- Martínez-Gamiño, M.A. y P.M. Walthall. 2000 b. Cambios morfológicos durante el encostramiento de la superficie en suelos de México y Louisiana, EU. *TERRA, Latinoamericana*. Vol (18), 3: 187-197 p.
- Massobrio, M.J., M.G. Castiglioni, C.I. Chagas, O.J. Santanatoglia. 1998. Análisis de sensibilidad de un modelo predictivo distributivo de producción de sedimentos y nutrimentos asociados (AGNPS), en una microcuenca del arroyo del Tala, Argentina. *TERRA, Latinoamericana*. Vol (16). 4: 371-377 p.
- Miranda, N.E. 2006. Caracterización hidrodinámica del suelo superficial en la cuenca media alta del río Conchos. Tesis de licenciatura, Facultad de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Moñino, A. 2004. Trabajo de campo. Informe Técnico X.2, en estudio piloto para la gestión integrada de una cuenca hidrológica del río Guadalfeo. Grupo de Ríos y Embalses, Universidad de Granada, España. 24-26 p.
- Morales, R.L., O.L. Palacios, L.S. Marín and S.D. Peña. 2000. Flow direction and ground water classification in Monte Alegre, Sierra del Ajusco, México. *Agrociencia* 34: 677-687 p.
- Moreno, A.J. 2006. Sistemas y Análisis de la Información Geográfica, Manual de Autoaprendizaje con ArcGis. 1ª ed. Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid. Ed. Alfaomega. 40-45 p.

- Murillo, S. 2002. Estudio del efecto del cambio de uso de suelo en el escurrimiento en la Subcuenca 24bf Monterrey, aplicando un sistema de Información geográfica. Tesis, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey. 10-12 p.
- Nanía, L.S. 2003. Hidrología superficial: La cuenca y los procesos hidrológicos. Curso académico, ingeniería hidráulica. Universidad de Granada, España. 4-5 p.
- Navar, J. y T.J. Synnott. 2000. Soil infiltration and land use in Linares, N.L., Mexico. *TERRA, Latinoamericana*. Vol 18 (3): 252-262.
- Navarrete, M. D. 2004. Propuesta metodológica para el análisis territorial en la cuenca hidrográfica del Estero El Peral, Comuna de Carahue, Informe de resultados en IX Región de Chile. Universidad Católica de Temuco, Chile. Facultad de Ciencias Ambientales.
- Navarrete, M. D. 2004. Propuesta metodológica para el análisis territorial en la cuenca hidrográfica del Estero El Peral, Comuna de Carahue, Informe de resultados en IX Región de Chile. Universidad Católica de Temuco, Chile. Facultad de Ciencias Ambientales.
- Oropeza, J.L. 1999. Modelos matemáticos y su aplicación al manejo de cuencas hidrológicas. IX Congreso Nacional de Irrigación, Simposium 4, Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas. Culiacán Sinaloa. 20-27 p.
- Paul, E. A. 1984. "Dynamics of organic matter in soil." *Plant and soil*. 79: 275 – 285.
- Pinedo, A.C., A.A. Pinedo, R.M. Quintana, S.M. Martínez. 2007. Análisis de áreas deforestadas en la región centro-norte de la Sierra madre Occidental, Chihuahua, México. *Tecnociencia Vol (1)*: 37-38 p.
- Quezada, E.J. 1989. Análisis del proceso de precipitación-escurrimiento como base para el diseño de obras de captación en tres localidades de la comarca lagunera. Tesis profesional, Universidad Autónoma Antonio Narro. Torreón Coahuila. 113 p.
- Reyes-Gómez, V.M. 2002. Quantification et modelisation des flux hydriques, thermiques, et azotes dans les systemes de culture en semis direct avec couverture vegetale dans la region des cerrados bresiliens. Tesis de doctorado. Docteur del 'Universite Montpellier 2. Paris Francia : 4 – 254 p.
- Richards, L:A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics Vol (1)*: 318-333 p.

- Rosano-Méndez, L., L.P. Rendón, P.H. Pacheco, J.B. Etchevers, J.M. Chávez y H.H. Vaquera. 2001. Calibration o fan hidrology model applied in the technology irrigation by gravity. *Agrociencia* 35: 577-588 p.
- Rubio, C. y P. Llorens. 2003. Uso de funciones de edafotransferencia para la determinación de propiedades hidrodinámicas de los suelos en una cuenca experimental. En: *Estudios de la zona no saturada del suelo*. Vol (VI): 137-142 p.
- Sáenz, G. 1999. *Hidrología de la ingeniería*. Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2ª ed. Colombia. 13-16 p.
- Sánchez, P.B. 2006. Caracterización hidrodinámica del suelo superficial en la cuenca media y baja del río Conchos. Tesis de licenciatura, Facultad de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Sánchez, R., S.C. Sánchez. A.L. Sánchez, M.G. Benítez y L.C. Alatorre. 2005. Efectos del manejo del suelos en la infiltración en una aforestación con *Quercus ilex* L. en un área semiárida de agricultura de temporal. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* Vol (1): 3-19 p.
- Singer, M.J. and D.N. Warrington. 1991. Crusting in the Western United States. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* (23): 152-156 p.
- Stern, R. M. Ben-Hur and I. Shainberg. 1991. Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. *Soil Sci.* (152): 455-462 p.
- Storck, P., L. Bowling, P. Wetherbee y D. Lettenmaier. 2000. Application of a GIS-Based distributed hydrology model for prediction of forest Harvest effects on Peaks Streamflow in the Pacific Northwest. <http://www.ce.washington.edu/~pxs/gis.html>.
- Tapia, V., L. M. Tiscareño L., J. Salinas R., M. Velázquez V., A. Vega P., H. Guillén A.. 2002. Respuesta de la cobertura residual del suelo a la erosión hídrica y la sostenibilidad del suelo en laderas agrícolas. *TERRA Latinoamericana*, vol. 20: (4) 449-457 p.
- Tapia, V., M.L. Tiscareño, J.L. Oropeza, J.J. Stone and M. V. Velásquez. 2000. Runoff and sedimenty yields simulation Ander five soil management practices. *Agrociencia* 34: 663-675 p.
- Torres, E.B., J.L. Oropeza y D.S. Fernández. 2000. Aplicación del modelo SWAT en la cuenca "El Tecolote", Atlacomulco, estado de México. X Congreso Nacional de Irrigación de Cuencas Hidrológicas. Anei, A.C.

- Torres-Benites, E., E.S. Mejía, J.B. Cortes, E.V. Palacios y A.G. Exebio. 2005. Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. *Agrociencias* 39: 481-490 p.
- Treviño, E. J., C. A. Muñoz R., C. Cavazos C. y L. Barajas Chávez. 2002. Evaluación del flujo hídrico superficial en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas. *Ciencia Universidad Autónoma de Nuevo León, México*. 5: 525-530 p.
- Treviño, E., O.A. Aguirre, W. Salinas, X. Némiga, J.V. Chávez. 2005. Evaluación de la producción de agua usando modelos de análisis geográfico. *Revista Internacional de Ciencias de la Tierra*. 2:123-127 p.
- Treviño, E., O.A. Aguirre, W. Salinas, X. Némiga, J.V. Chávez. 2005. Evaluación de la producción de agua usando modelos de análisis geográfico. *Revista Internacional de Ciencias de la Tierra*. 2:123-127 p.
- Viramontes, D., L. Descroix y A. Bollery. 2006. Variables de suelos determinantes del escurrimiento y la erosión en un sector de la Sierra Madre Occidental. *Ingeniería Hidráulica en México IMTA, Cuernavaca, Morelos*. Vol (21). Núm (1): 73-83 p.
- World Water Resources Institute. 1994. *A Guide to the Global Environment: People and the Environment*. Oxford University Press. New York, USA. 15-30 p.
- Wurbs, R. y W.P. James. 2002. *Water resources engineering*. Prentice Hall. Englewood Cliff. 21-24 p.
- Znag, R. 1997. Determination of soil sortivity and hidraulic conductivity from the Disk infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: J., 61: 1024-1030 p.

## CAPÍTULO 2

En el presente capítulo, se hace referencia a los resultados obtenidos a partir de varios trabajos realizados con la técnica de simulación de lluvia y el método de Beerkan de infiltración controlada en parcelas experimentales, distribuidas en la cuenca alta y media del Río Conchos.

Los resultados generados, se publicaron en la revista de Ingeniería Hidráulica de México del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), donde se presentó el artículo “Papel Hidrológico-Ambiental de las Propiedades Hidrológicas del Suelo Superficial de la Cuenca del Río Conchos”, con una participación del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, la Facultad de Zootecnia de la Universidad Autónoma de Chihuahua en coordinación con el Centro de Investigación Sobre Sequía (CEISS) del Instituto de Ecología A.C.

A continuación, se describen ampliamente los procesos llevados a cabo dentro de la investigación. También, será un antecedente importante para calcular el coeficiente de escurrimiento en las zonas asignadas que serán consideradas en la validación y calibración del modelo de estimación del volumen medio escurrido en la cuenca del Río San Pedro, Conchos (Capítulo 5).

**PAPEL HIDROLÓGICO-AMBIENTAL DE LAS PROPIEDADES  
HIDRÁULICAS DEL SUELO SUPERFICIAL DE LA CUENCA DEL  
RÍO CONCHOS.**

**Por:**

**OSCAR ALEJANDRO VIRAMONTES OLIVAS**

**RESUMEN**

Actualmente se valoriza el papel hidrológico ambiental del bosque, buscando crear un cambio de actitud en los usuarios de ese recurso natural con el fin de que brinde por tiempo indefinido su función natural y mantenga el equilibrio ecológico a favor del desarrollo sustentable de las sociedades y asegurar el futuro de las nuevas generaciones. En México, aún existen controversias de cómo determinar las funciones hidrológicas de un ecosistema; la presente investigación muestra una forma diferente de adoptarse, de cómo el conocimiento básico generado sobre el comportamiento hidrológico de cuencas como la del Río Conchos en Chihuahua, puede ser utilizado para visualizar y cuantificar las funciones hidrológicas ambientales que están prestando los suelos de bosque y de pastizal en la cuenca. Se presentan los resultados sobre las aptitudes de los suelos en cuanto a infiltración y escurrimiento, así como de la conductividad hidráulica del suelo, asociado a bosque y pastizal en las zonas altas y media de la cuenca, como indicadores de funciones hidrológico-ambientales. Se emplearon dos metodologías de análisis *in situ*: la simulación de lluvia y el método Beerkan de infiltración controlada. Los resultados muestran que el suelo de bosque permite 60 % de infiltración de una lluvia

registrada, alcanzando en muchos casos el 100 % cuando el suelo está cubierto por mantillo; pero disminuyendo hasta 40 %, si está desprovisto de vegetación de bosque y hasta 20 % ó menos, en caso de superficies encostradas. La propiedad del suelo de dejar pasar el agua medida por su conductividad hidráulica, muestra que las zonas de recarga más importantes son aquellas donde el suelo está provisto de hojarasca; mientras que en zonas con un alto potencial para producir escurrimiento fueron las de pastizal y sobre todo las desprovistas de vegetación y con presencia de costras endurecidas.

**PALABRAS CLAVE:** características físicas, Río Conchos, lluvia, velocidad de infiltración, escurrimiento.

# **ENVIRONMENTAL-HYDROLOGICAL ROLE OF THE HYDRAULICS PROPERTIES OF THE SUPERFICIAL SOIL IN THE WATERSHED OF THE RIVER CONCHOS.**

## **ABSTRACT**

Actually the role of the hydrologic environment of the forest is being valued in order to create a change of attitude on the users of those natural resources, it allows offering for indefinite time their natural function and the ecological balance be kept in the process of the sustaining the development of the societies and to assure the future of the new generations. There still are in Mexico controversies on how to determine the hydrological functions of an ecosystem; it is shown on this study a different and easy way to be adopted, on how the basic knowledge generated about the hydrologic behavior of basins as the Conchos River in Chihuahua, can be used to visualize in a quantitative way the hydrologic functions being given by the forest and pasture soils included in the basin. The results on the aptitudes of infiltration and running are included, as well as the hydraulic conductivity of the soil associated to the forest and pasture on the high and middle areas of the basin, as indicators of the hydrologic-environmental functions. Two methodologies were used *in situ*: the rainfall simulation and the Beerkan method on controlled infiltration. The results show that the forest soil allows 60% of a natural rain infiltration, reaching in many instances 100% of infiltration when the soil is covered by litter. The infiltration decreases up to averages near 40% when the soil is lacking forest vegetation, due to natural causes or due to a change on the use of the soil, decreasing up to

20% or less in the case of soil with crusted surface. The property of the soil to allow water in measured by its hydraulic conductivity to saturation, show that the most important reloading areas are those in which the soil is provided with fallen leaves coming from the tree species of the forest (litter: pine tree, ever green oak, cedar); while the areas with a high potential to produce a running were the natural or induced pasture areas and above all the ones lacking vegetation and with the presence of hard crusts.

**KEY WORDS:** Hydrological functions, Conchos River, rain, infiltration, runoff.

## INTRODUCCIÓN

La cuenca del Río Conchos ubicada en el estado de Chihuahua, México, presenta la problemática típica de todos los ecosistemas con un alto incremento de población, ganadería, agricultura intensiva y uso desmedido de los recursos naturales. Estos procesos, impactan las aptitudes de infiltración y escurrimiento superficial del suelo que determinan el funcionamiento hidrológico de la cuenca. Las metodologías para cuantificar esas aptitudes, fueron desarrolladas para determinar las características físicas de los suelos agrícolas a fin de estimar las tasas de erosión edáfica de uso forestal ó de pastoreo, principalmente y en la modelización de flujos hídricos en suelos (De Condapa, 2000; Cassenave y Valentin, 1989; Descroix *et al.*, 2002, Viramontes *et al.*, 2002).

En las zonas áridas y semiáridas del mundo, se han desarrollado estudios con el propósito de evaluar la costra superficial del suelo sobre las propiedades hidrodinámicas del mismo (Belnap *et al.*, 2001; Warren, 2001a, Grunberger y Janeau, 2005; Reyes-Gómez, 1996,).

Algunos métodos como la simulación de lluvia y la infiltración controlada que se aplican en forma controlada e *in situ*, generan resultados cuantitativos en términos de volúmenes de agua que puede escurrir o infiltrarse dentro del suelo cuando se presenta una lluvia y cuando el suelo se encuentra en condiciones de inundación; éstos métodos, son sencillos y menos costosos, si se considera que el aforo de grandes cuencas y su mantenimiento implican un mayor gasto, más tiempo de estudio y un mayor número de personal de apoyo. La experimentación *in situ*, presenta ventajas de reproducir procesos físicos del

suelo de una forma muy cercana a como ocurren de forma natural, lo que nos permite visualizar con mayor claridad el papel hidrológico ambiental del suelo de bosque en zonas de recarga que sustentan el desarrollo de la población y el equilibrio del ecosistema aguas abajo.

El objetivo de esta investigación, es evaluar los resultados sobre las aptitudes de infiltración y escurrimiento de agua de lluvia en los primeros 15 cm de la capa de suelo en sitios representativos de la cuenca alta y media del Río Conchos. Además de proponer dos experimentos controlados *in situ*, como herramientas para evaluar de forma cuantitativa la función que brinda el suelo, asociado al bosque, sobre los servicios ambientales hidrológicos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo, se realizó en el Cuerpo Académico de Suelo y Agua del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, ubicado en Boulevard Carretera a Delta/Oaxaca S/N, Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California (C.P. 21705), en coordinación con el área de informática del Centro de Investigación Sobre la Sequía (CEISS) perteneciente al Instituto de Ecología A.C., localizado en el kilómetro 33.3 de la Carretera Chihuahua-Ojinaga, municipio de Aldama, Chihuahua.

### **Descripción del Área de Estudio.**

**Localización.** Se realizó en la cuenca del Río Conchos (Figura 1) que es la más importante en el estado de Chihuahua. Se encuentra dentro de la Región Hidrológica 24 Río Bravo<sup>1</sup> (CNA, 2001a) dividiéndose en cinco subcuencas: Río Conchos, San Pedro, Florido, Conchos-Ojinaga, Conchos-La Boquilla (Figura 2) con una superficie de 68,387 km<sup>2</sup> (Carreón *et al.*, 2001) que representa 30.2 % de la superficie total del Estado. Forma parte de la cuenca del Río Bravo que ocupa 14 % del área total de la misma, a una altitud de 2,348 msnm (parte alta) donde inicia el río del mismo nombre (municipio de Bocoyna) que recorre 850 km, hasta unirse al río Bravo en la parte baja a 841 msnm (municipio de Ojinaga), según lo menciona Aboites-Aguilar (2002).

**Hidrología general.** El Río Conchos, nace en la Sierra Madre Occidental y discurre en dirección Oeste-Este, recibiendo tributarios de la misma sierra; los más importantes, los ríos Florido, Balleza, San Pedro, Santa Isabel, Satevó,

---

<sup>1</sup> La mayor parte de la información oficial, establece esta delimitación, sin embargo, el Programa Nacional Hidráulico 2001-2006 la ubican como Región Hidrológica-Administrativa VI Río Bravo, con una extensión de 377 mil km<sup>2</sup> (CNA, 2001b).

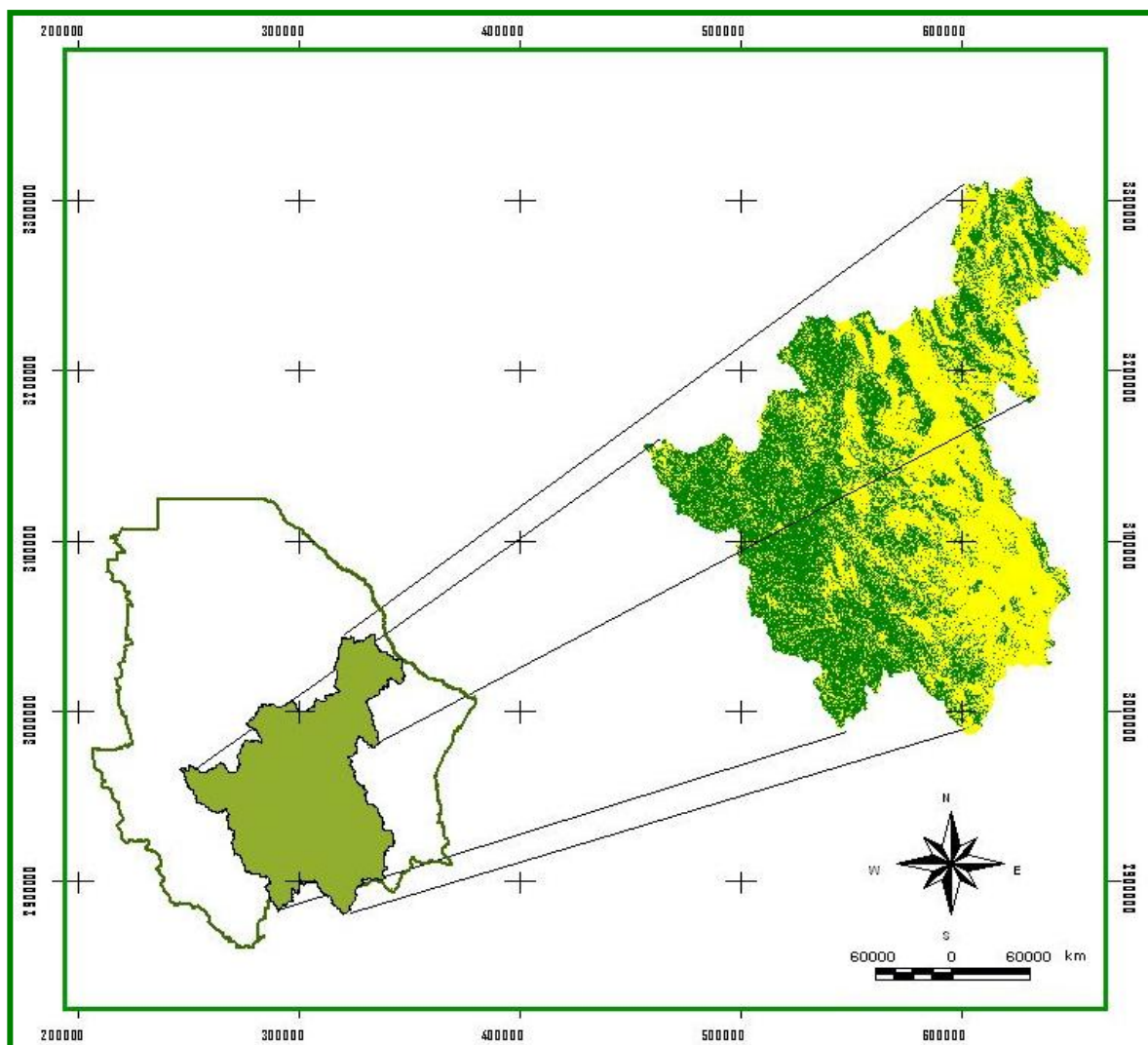


Figura 1. Representación del área general de estudio (cuena del Río Conchos, Chihuahua).

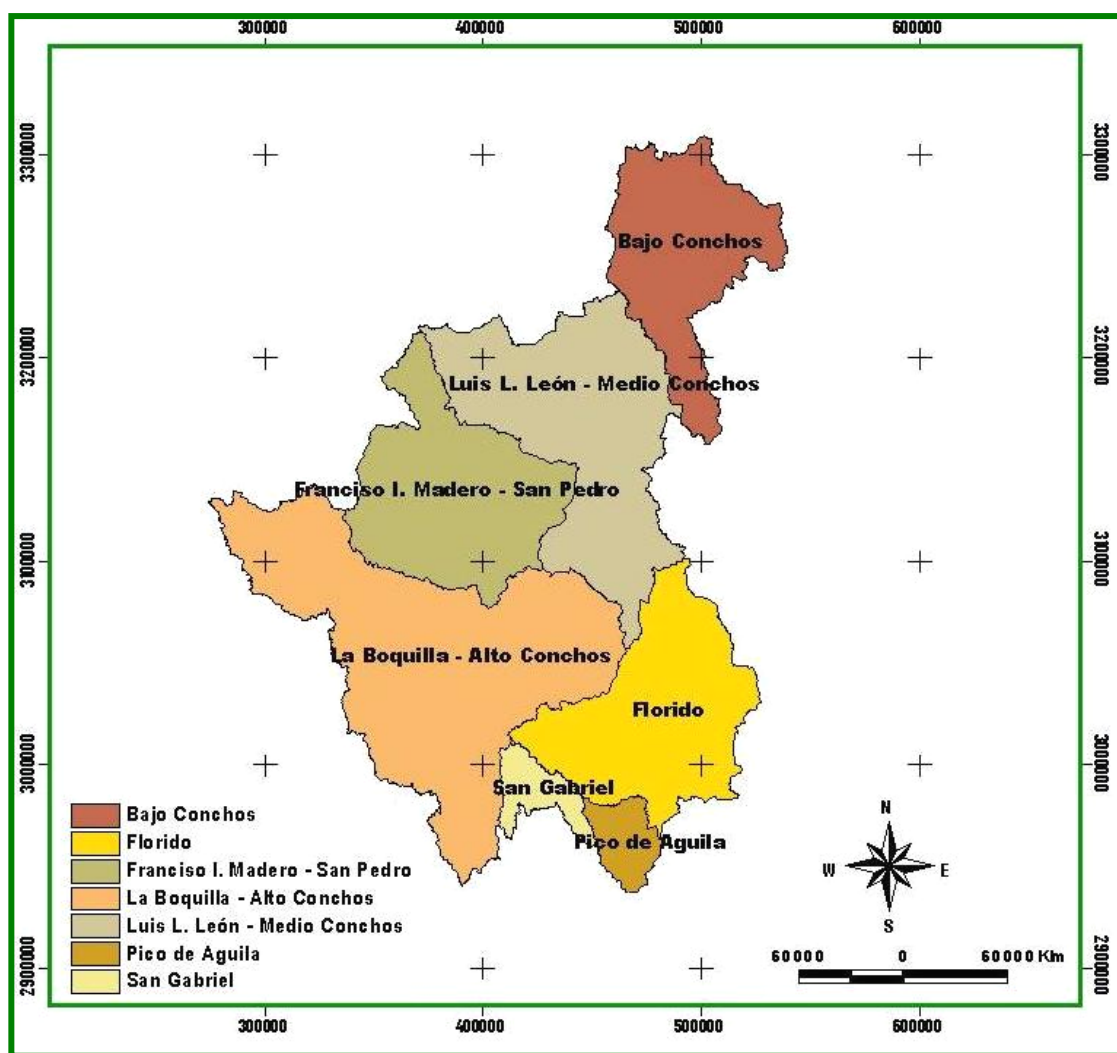


Figura 2. División de la cuenca del Río Conchos.

Chuviscar y Sacramento. Se interna en la región de la meseta donde recibe afluentes y en el municipio de Zaragoza, es represado en la presa La Boquilla (Figura 3) que es la más grande en el estado de Chihuahua, formando el Lago Toronto, cuya función es generar energía eléctrica y dotar de agua a las zonas agrícolas. El Río Conchos, es nuevamente represado (6 km aguas abajo), formando el Lago Colina, pasando posteriormente por la ciudad de Camargo, principal centro agrícola de la región del Río Conchos y junto a la ciudad, recibe como tributario al Río Florido (Nelly, 2001). A partir de este punto, el Río Conchos toma dirección hacia el norte, torciendo hacia el norte y formando la presa Rosetilla, recibiendo por su margen izquierdo al Río San Pedro muy cerca de la ciudad de Delicias, donde sus aguas son utilizadas en el Distrito de Riego 005 de ciudad Delicias, Chihuahua. Posteriormente, sigue su curso por el desierto chihuahuense, cambiando su dirección al noroeste, cruzando los municipios de Julimes, Aldama, Coyame y Ojinaga; en Aldama, es embalsado en la presa Luis L. León, mejor conocida como “El Granero” y finalmente, atraviesa el “Cañón del Pegüis” formando la última presa, la Toribio Ortega, en las cercanías de Ojinaga, donde finalmente se une al Río Bravo (CNA, 2001a).

La disponibilidad de agua que alcanza la cuenca (CNA, 2001b) es alrededor de los 4 mil  $Mm^3$ , considerando sus dos fuentes de abastecimiento, por un lado, 2,714  $Mm^3$ , provenientes de escurrimientos superficiales vírgenes y 1,363  $Mm^3$  de 17 depósitos subterráneos identificados.

**Clima.** La cuenca del Río Conchos, tiene una amplia diversidad de climas y según la clasificación de Köppen, modificado por García (2004) se encuentran: BSokw, árido, templado con verano cálido; BWhw(w), semi cálido del grupo de

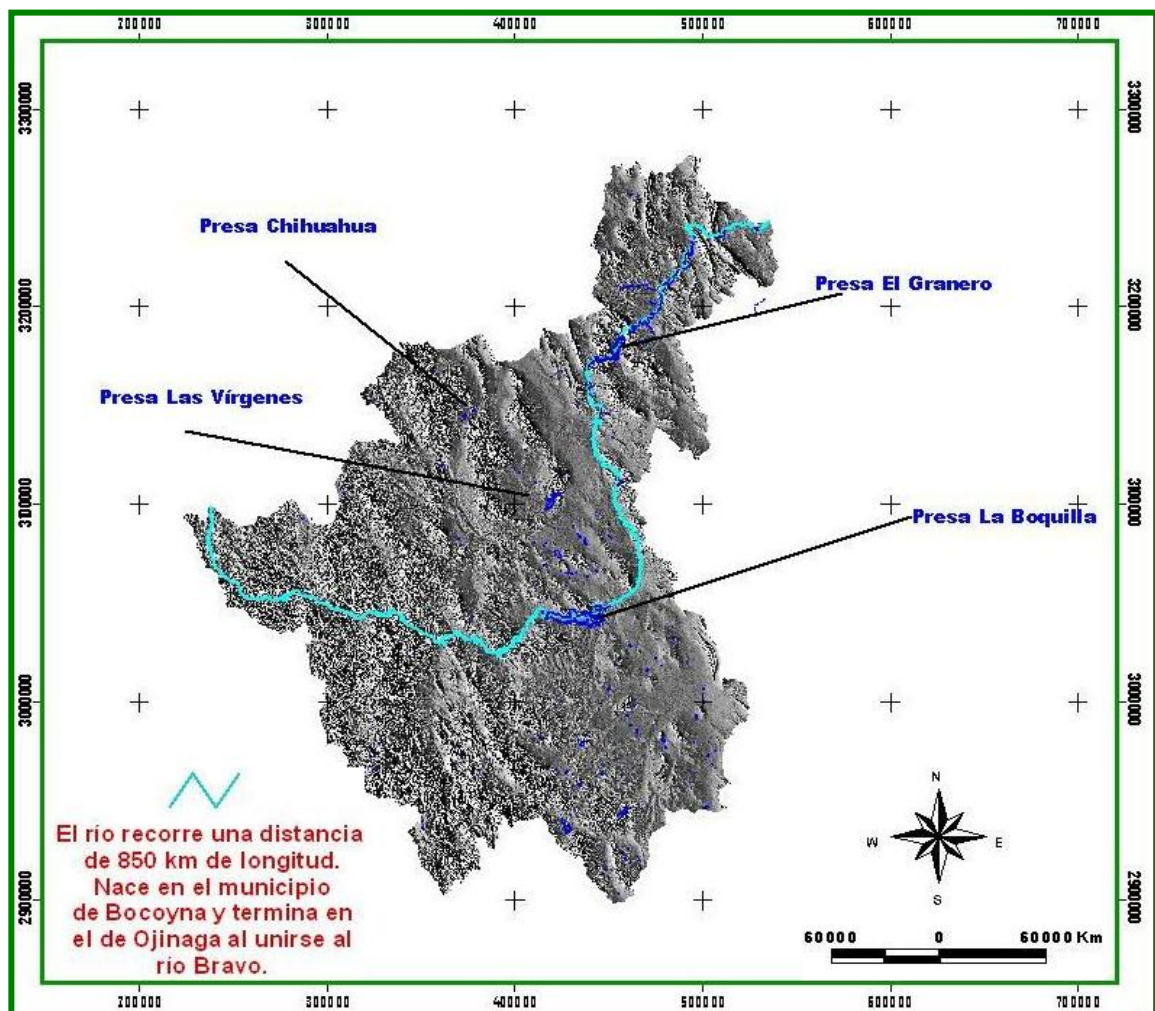


Figura 3. Principales presas en la cuenca del Río Conchos, Chihuahua.

los templados; BS1k" w(w), semi frío; Cb"(w2)x", semi cálido con verano fresco y largo; BSohw, árido, semi cálido del grupo de los templados; BWkw, templado con verano cálido; BSokw(w), árido y templado con verano cálido; C(w1)x`a, templado con verano cálido; Cb'(w2)x`, semi frío con verano fresco y largo; Cb'(w2), semi frío con verano fresco y largo y BS1 hw(w), semi cálido del grupo de los templados (Figura 4).

**Vegetación.** Cuenta con una gran diversidad de especies vegetales, los cuales la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, (Conabio, 2006) hace una clasificación de la misma en toda la extensión de la cuenca del Río Conchos. En la cuenca alta, se encuentra el pastizal natural huizachal, matorral desértico micrófilo, matorral desértico rosetófilo, bosques de pino-encino, encino-pino, de encino y vegetación halófila; en la parte media y baja, la flora dominante del paisaje es el pastizal amacollado abierto utilizado sobre todo en la ganadería.

El estrato arbóreo se compone principalmente de matorral espinoso donde predomina el huizache (*Acacia farnesiana*); la superficie está cubierta por zacate borreguero (*T. pulchelus*) y hay presencia esporádica de otros como: navajita (*Bouteoloua gracilis*), banderita (*Bouteoloua curtispindula*) y tempranero (*Setaria macrostach*), con arbustivo de cenizo y *Parteniun incanum* (mariola), con presencia menos importante de *Jatropha dioica*. Además existen zonas pobladas de lechuguilla (*Agave lechuguilla*), ocotillo (*F. splendens*) y algunas franjas de sotol (*Dasilirium spp*); existen escasas cactáceas donde destacan el tasajillo (*O. leptocaulis*), mamilarias (*Mamilaria spp*), viznagas y el nopal morado

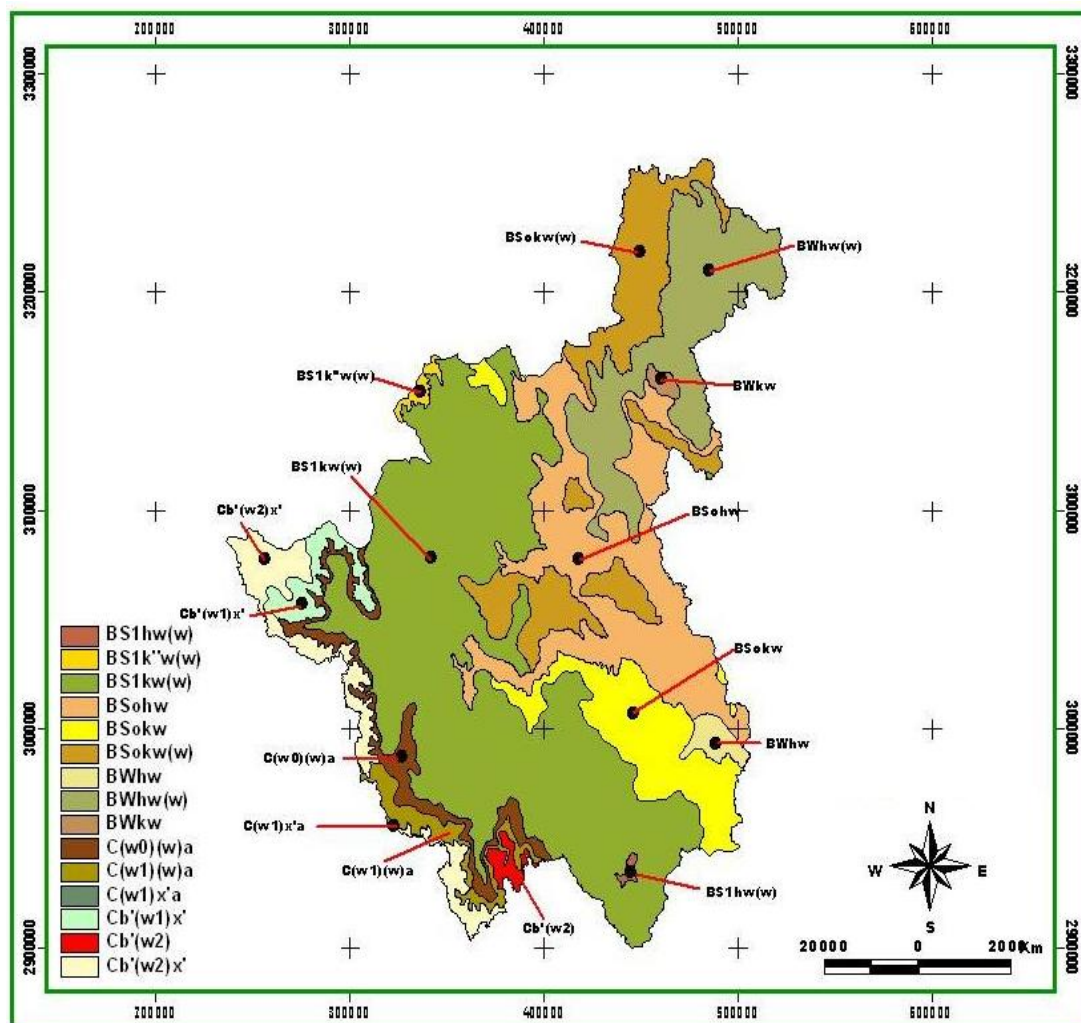


Figura 4. Distribución de climas en la cuenca del Río Conchos, Chihuahua.

(*O. violacea*), presencia de algunas matas de esporobolus (*Sporobolus airoides*) y yucas en algunas zonas del paisaje (Sánchez, 2006). En base a lo anterior, la diversidad existente ha favorecido al desarrollo de diversas actividades en la zona (actividad forestal, ganadería extensiva y el uso de plantas con fines medicinales) como se muestra en la (Figura 5).

**Geología y geoformas principales.** Sánchez (2006) describe la parte media y baja de la cuenca del Río Conchos, donde existen conglomerados del Terciario y Cuaternario (cerros, pies de monte, bajadas, lomas y valles) entre las sierras Tarahumara, de Las Pampas, Los Remedios, Las Vírgenes, El Llano, Los Gigantes, La Quemada y Cuchillo Parado.

En la zona, predominan varios tipos de suelo, como: el Regosol, Chernozem, Feozem, Cambisol, Fluvisol, Kastañozems, Litosol, Planosol, Regosol, Rendzina, Solonchack, Vertisol, Yermosol y Xerosol (Figura 6).

La topografía del terreno es de lomeríos altos y medianos con pendiente compleja que varía de 30 % al 5 %; pertenece a la clase de suave a quebrado o quebrado y cerril. El suelo en este paisaje, se caracteriza por una capa superior que varía de espesor con relación a la pendiente. En las partes altas, dicha capa es más delgada que en la parte baja del paisaje; una tercera, está presente sobre todo en las partes medias y bajas del paisaje. La compactación del suelo, es más evidente en la parte media y baja. La textura del suelo varía desde gruesa en la parte alta y el horizonte superior (0-15 cm), hasta fina o muy fina en las zonas medias y bajas (Conabio, 2006).

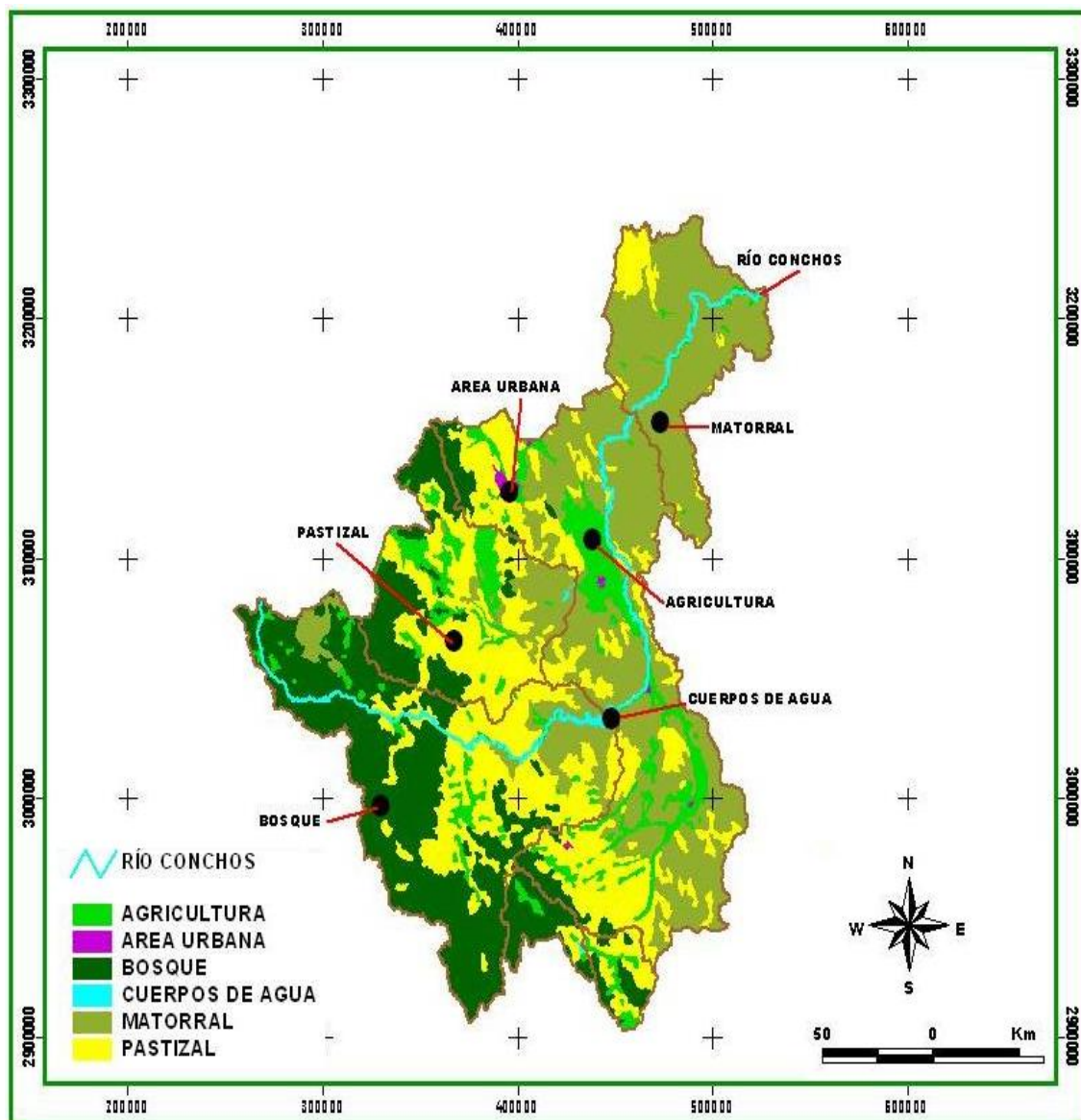


Figura 5. Distribución vegetativa en la cuenca del Río Conchos, Chihuahua.

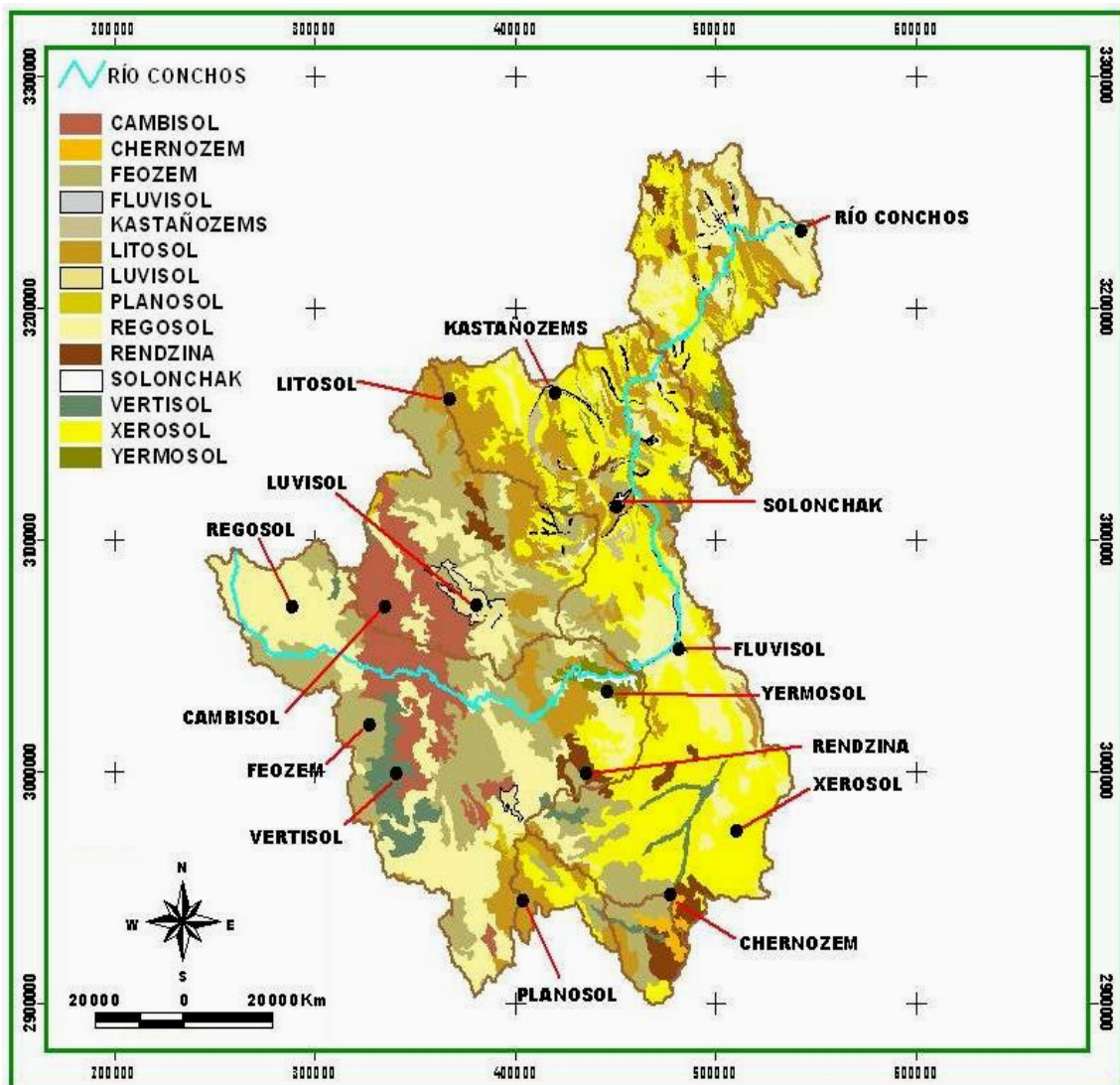


Figura 6. Distribución edáfica en la cuenca del Río Conchos, Chihuahua.

## **Metodología.**

La investigación se realizó en la parte alta y media del Río Conchos (1500 a 2700 msnm) perteneciente a los municipios de Bocoyna (sitios 1, 2 y 3), Valle de Zaragoza y Balleza (sitios 4 y 5, respectivamente). Los criterios de selección de los sitios experimentales, fueron: su geología, el suelo y el tipo de vegetación (Figura 7). En cada sitio, se escogieron aleatoriamente tres puntos en suelo cubierto de bosque y tres desprovistos de vegetación ó cubiertos por un estrato herbáceo dominado por algún tipo de pastizal.

El diseño consistió en seis repeticiones por sitio para conocer las aptitudes de infiltración y escurrimiento mediante la reproducción de lluvia natural y de 15 repeticiones por sitio en la determinación de las propiedades hidráulicas del suelo bajo condiciones de inundación. Dicho diseño, fue sistematizado en las dos experimentaciones que proponen aplicarse en más sitios puntuales de estudio dentro de la cuenca del Río Conchos ó en cualquier otra cuenca; no obstante, puede ser modificado el número de repeticiones y magnitudes de intensidad de lluvia para otros proyectos cuyo objetivo sea visualizar el efecto de la intensidad y duración de la lluvia sobre el volumen de escurrimiento.

Se describió el suelo superficial de cada sitio (los primeros 30 cm), según Casenave y Valentin (1989); se cuantificó la cubierta vegetal por líneas de Canfield en una superficie de 1 m<sup>2</sup>; se determinó de forma sistematizada la relación porcentual de elementos como grava, mantillo, costra y vegetación; se estimó la pendiente (Nivel NA28 Leica), rugosidad y tortuosidad (índices de

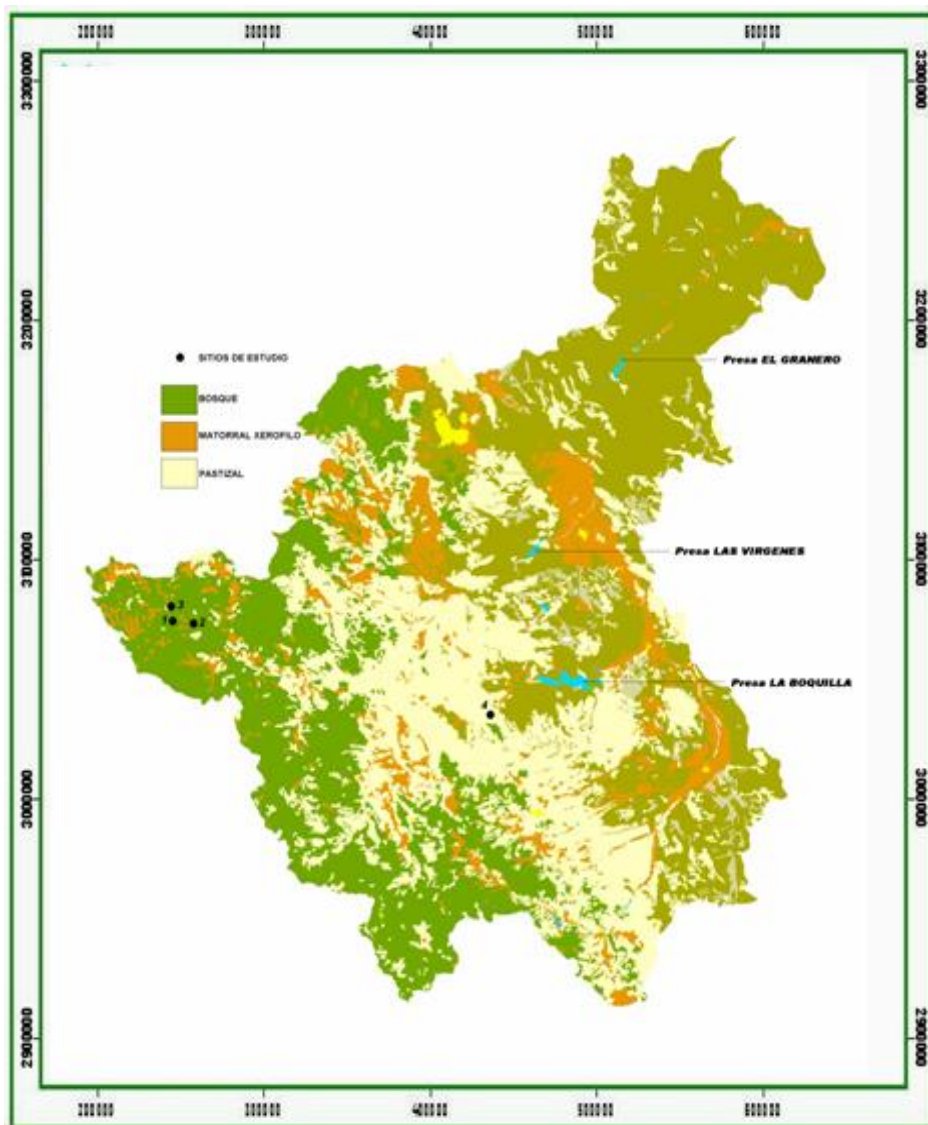


Figura 7. Localización de los sitios de estudio en la parte alta y media de la cuenca del Río Conchos, Chihuahua.

distancias relativas con el método de la cadena), como parámetros físicos de superficie que afectan el escurrimiento superficial del agua (Findeling, 2001).

**Aptitudes de infiltración y escurrimiento.** La capacidad del suelo para dejar pasar agua en forma de infiltración o para generar escurrimiento. A través de la simulación de lluvia, se puede (metodología descrita en Asseline y Valentín, 1978) reproducir una lámina de lluvia constante durante un tiempo definido, hasta alcanzar el punto de saturación del suelo superficial donde se aplicaron los eventos de lluvia con el simulador. El dispositivo de simulación, cuenta con un control electrónico que permite regular la intensidad del evento y cuando hay producción de escurrimiento, mide su volumen total. Conociendo la lámina de lluvia que se aplicó, el volumen de escurrimiento y los tiempos de duración del evento, pueden cuantificar la lámina de infiltración dentro del suelo.

Se aplicó una lluvia de aproximadamente  $60 \text{ mm h}^{-1}$ , al menos de 30 min de duración ó hasta alcanzar un régimen permanente de escurrimiento. Se consideraron estados de suelo seco y a saturación aparente, ya que esta segunda lluvia se aplicó media hora después del primer evento, lo que asegura una saturación al 100 % en los primeros 15 cm de suelo (constatado al lado de las parcelas). Estos dos estados de humectación sirvieron de criterio para evaluar el efecto de humedad inicial existente en el suelo sobre las aptitudes hidrológicas del suelo.

La relación que liga la interfase lluvia-infiltración-escurrimiento por simulación de lluvia controlada *in situ*, está dada por:

$$LP = Le + (Li + Ds) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:  $L_p$  = Lámina de lluvia aplicada (mm), medida en campo;  $L_e$  = Lámina de escurrimiento (mm), determinada en campo;  $D_s$  = Lámina de agua de retención superficial en charcos y rugosidad excesiva (mm), que en los sitios de estudio, se consideró con un valor de cero porque el micro relieve del suelo no presentó formación de charcos ni retención aparente de agua, estimada en campo;  $L_i$  = Lámina de infiltración (mm), se estima a partir de la relación anterior ( $L_i = L_p - L_e$ ).

A cada lluvia natural que llega a la superficie del suelo, le corresponden: un volumen que se puede infiltrar y que refleja la aptitud del suelo para dejar entrar el agua ( $K_i$ ) y otro volumen que se puede “perder” en forma de escurrimiento, reflejando la capacidad del suelo para generar escorrentías ( $K_e$ ). Dichos índices se establecen mediante la relación:

$$K_e = \frac{L_e}{L_p} 100 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $K_e$  es el coeficiente de escurrimiento de un suelo dado que refleja la capacidad del suelo para producir escorrentías (%).

A esta relación, le corresponde un complemento de lluvia que cae en una superficie de suelo bien delimitada, dada por la siguiente relación:

$$K_i = \frac{L_i}{L_p} 100 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde  $K_i$  (%) representa el agua de infiltración en el suelo, cuando se aplica una lluvia de forma controlada, lo que visualiza la aptitud del mismo para permitir que fluya hacia capas subyacentes.

**Propiedades hidráulicas del suelo.** Estas propiedades, son las que explican

el proceso mediante el cual el agua se infiltra, siendo: la textura, estructura, permeabilidad y la conductividad hidráulica. La sortividad, que representa la capacidad del suelo para absorber agua en ausencia de la gravedad, conocida como capilaridad (Hillel, 1980) y las curvas de retención de humedad que traducen el contenido de humedad del suelo retenida a un potencial hídrico (Haverkamp *et al.*, 1990; Findeling, 2001).

En este trabajo, se trata particularmente de estudiar la evolución del proceso de infiltración con el fin de determinar la propiedad hidráulica más importante del suelo, la conductividad hidráulica a saturación ( $K_h$  de los primeros 15 cm), que traduce la facilidad o “resistencia” del suelo por dejar pasar agua, reflejando el papel del mismo en la captación hídrica de lluvia (servicio o función hidrológica).

En la literatura relacionada a la teoría sobre las propiedades hidráulicas del suelo, se menciona que en la naturaleza es precisamente el suelo el soporte físico del proceso de infiltración, donde se cumple esa formalización generalizada que siempre es descrita mediante ecuaciones empíricas o basadas teóricamente en leyes físicas (Hillel, 1980). De los modelos que explican de forma más precisa el proceso de infiltración en un suelo, es la formulación dimensional conocida como Ecuación de Richards (1931) que es un modelo aplicado a un suelo hipotéticamente compuesto de un solo horizonte homogéneo con espesor bien delimitado. Sin embargo, la ecuación de Richards no tiene solución analítica conocida debido a la complejidad de las condiciones iniciales y de los límites (Haverkamp *et al.*, 1990).

De los modelos más usuales de tipo empírico con solución analítica, es la ecuación de Green y Ampt (1911) que recientemente se ha usado para ejemplificar de forma precisa los principios fundamentales de la infiltración y su adimensionalización (Chérif *et al.*, 2004).

### **Método Beerkan.**

A partir de mediciones simples en campo, es posible obtener los parámetros físicos del comportamiento hidrodinámico del suelo. Los datos necesarios para este proceso son:

**a) Textura:** para determinar los parámetros de forma de la granulometría del suelo  $n$ ,  $m$  (estimados a partir de la curva granulométrica completa considerando las partículas de arcilla, limo y arena);

**b) Forma de la conductividad hidráulica a saturación ( $\eta$ ):** descrito en los párrafos precedentes;

**c) Densidad aparente del suelo ( $D_a$ ).**

**d) Porosidad total del suelo:** que representa la humedad de saturación del suelo  $\theta_s$ ;

**e) Humedad inicial del suelo ( $\theta_o$ )** e infiltración acumulada en función del tiempo ( $I(t)$ ). El resultado del proceso de infiltración acumulada a forma adimensional e invariante genera la siguiente ecuación (De Condapa, 2000):

$$I^* = t^* + \ln(1 + I^*) \quad \text{Ec. 4a}$$

$$I^* = \alpha_1 (I - K_0 t) \quad \text{Ec. 4b}$$

$$t^* = \alpha_1 t \quad \text{Ec. 4c}$$

Donde,  $I$  e  $I^*$ , representa respectivamente las infiltraciones acumuladas dimensional (m) y adimensional;  $t$  y  $t^*$ , los tiempos dimensional (s) y adimensional transcurridos después del inicio de la infiltración respectivamente;  $\alpha_I$  y  $\alpha_t$ , parámetros de adimensionalización de la infiltración ( $m^{-1}$ ) y del tiempo ( $s^{-1}$ ) respectivamente;  $K_0$  la conductividad hidráulica a la humedad inicial del suelo ( $m\ s^{-1}$ ).

Los valores de  $I$ ,  $t$  y los parámetros  $\eta$ ,  $n$  y  $m$  se obtuvieron a partir de la experimentación mostrada en la Figura 8. El protocolo de infiltración *in situ* consiste en aplicar una lámina constante de agua (> 4 cm) dentro de un cilindro de PVC con diámetro de 20 cm. Los valores de agua infiltrada en función del tiempo, reproducen la evolución de las curvas de infiltración que ocurren en condiciones naturales. A partir del juego de valores de lámina de agua infiltrada y tiempo obtenidos en campo, se calculó la infiltración acumulada en función del tiempo ( $I$ ,  $t$ ). Con estos valores de  $I$  y  $t$ , se obtiene un segundo valor de  $t$  proveniente de las relaciones adimensionales descritas en el párrafo anterior, involucrando los valores de los parámetros de adimensionalización  $\alpha_I$  y  $\alpha_t$ .

Esto se realiza sustituyendo las ecuaciones 4b y 4c en la ecuación 4a y conociendo que a tiempo  $t=0$ ,  $K_0$  toma un valor de 0, se llega a la siguiente ecuación que considera los parámetros buscados:

$$\alpha_I I = \alpha_t t + \ln(1 + \alpha_I I) \quad \text{Ec. 5}$$

Con la opción de SOLVER en EXCEL, se realizó un ajuste inverso y se obtuvieron los mejores valores de los parámetros de forma de la curva de

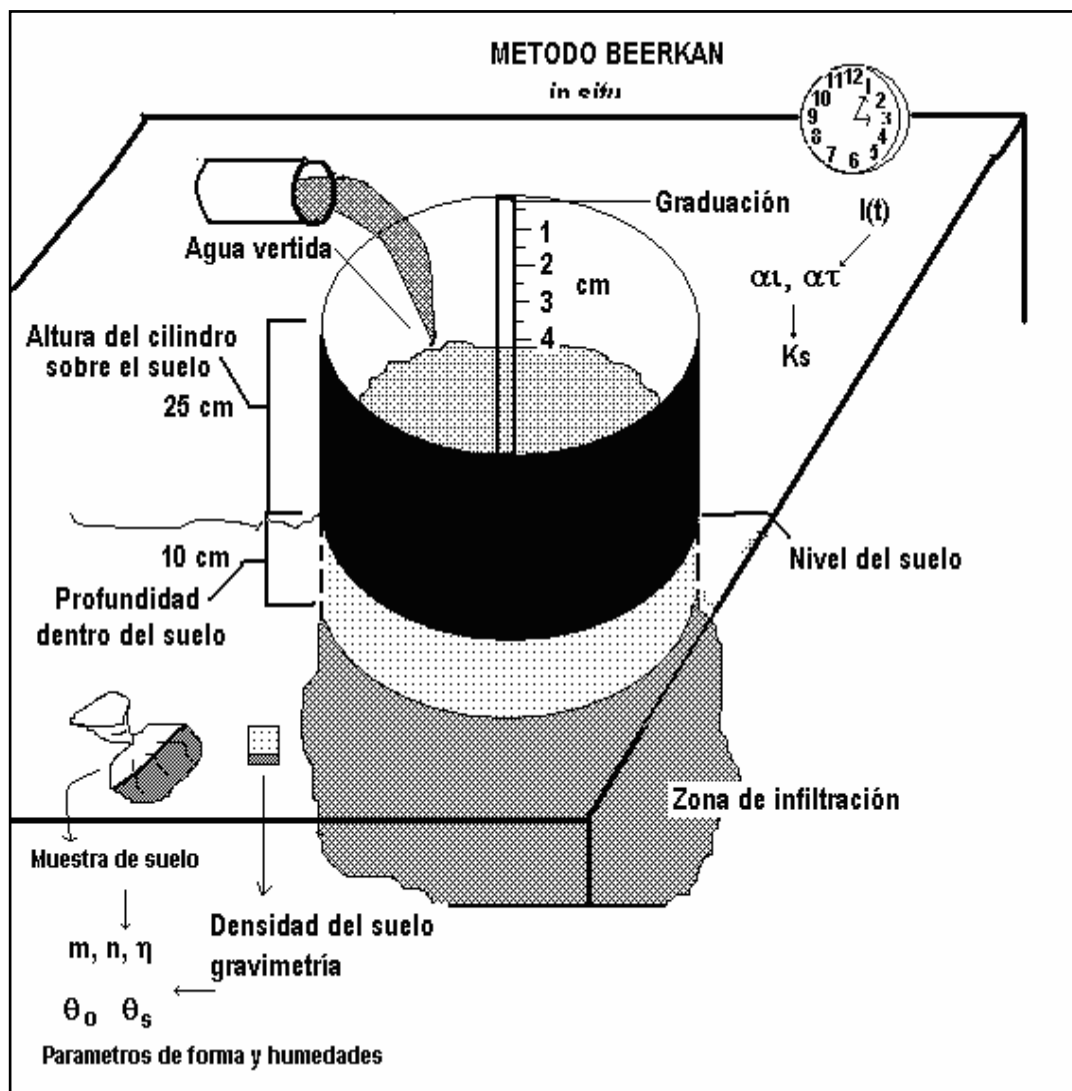


Figura 8. Diagrama de la experiencia *in situ* del Método Beerkan para obtener la conductividad hidráulica del suelo.

infiltración acumulada adimensional e invariante (Ec. 4a). El método utilizado fue el mínimo del error cuadrático.

Una segunda fase del método Beerkan, consistió en determinar los parámetros de forma  $m$ ,  $n$  y de conductividad hidráulica  $\eta$ , apoyándose en la teoría de la similitud geométrica que permite ligar la curva de retención de humedad (modelo Van Genuchten, 1980) y la curva granulométrica del suelo, descritos a detalle en Haverkamp *et al.* (1994).

Se utilizaron mediciones de textura del suelo (ocho fracciones granulométricas), para determinar en este caso, el producto  $mn$  que se adquiere a partir de la relación de la distribución de partículas del suelo, por analogía a la curva de retención de Van Genuchten:

$$F(D_p) = \left[ 1 + \left( \frac{D_g}{D_p} \right)^N \right]^M \quad \text{Ec. 6}$$

Donde  $0 \leq F(D_p) \leq 1$ , masa acumulada de las partículas de suelo inferiores a  $D_p$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ );  $D_p$  y  $D_g$ , respectivamente los diámetro de las partículas de suelo y el parámetro de escala del diámetro de las partículas (m);  $M$  y  $N$ , parámetros de forma de la ley de distribución de las partículas. El parámetro  $\eta$  empleado más adelante en la determinación de  $K_s$ , dado por:

$$\eta = 3 + \frac{2}{mn} \quad \text{Ec. 7a}$$

Con

$$mn = f_{mn}(M, N, D_g) = \frac{MN}{1-p} \quad \text{Ec. 7b}$$

y

$$p = [(MN)^5 + 1]^{-\frac{1}{8}} \quad \text{Ec. 7c}$$

Donde  $\eta$  es el parámetro de forma de la curva de conductividad hidráulica del modelo de Brooks and Corey (Ec. 8), el producto  $mn$  es derivado de los parámetros de la curva de distribución de partículas del suelo (Ec. 6),  $p$  es un factor de optimización de parámetros de forma M, N.

Con los valores:  $\eta$ ,  $\alpha_l$  y  $\alpha_t$  se pudo determinar el valor de la conductividad hidráulica ( $K_s$ ) con una seguridad de que se cubren los requerimientos físicos y matemáticos para una gran gama de tipos de suelos (Fuentes *et al.*, 1992).  $K_s$  está dada por la ecuación siguiente que se deriva de la combinación del modelo Brooks y Corey (1964) y los parámetros de adimensionalización adquiridos de las relaciones descritas en el párrafo anterior:

El modelo Brooks & Corey está dado por:

$$\frac{K_0}{K_s} = \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta \quad \text{Ec. 8}$$

Conociendo que:

$$\Delta K = K_s - K_0 \quad \text{Ec. 9}$$

y que:

$$\Delta K = \frac{\alpha_t}{\alpha_l} \quad \text{Ec. 10}$$

Se pueden sustituir las ecuaciones 8 y 10 en la ecuación 9 dando la siguiente expresión:

$$\frac{\alpha_t}{\alpha_s} = K_s - K_s \left( \frac{\theta_o}{\theta_s} \right)^\eta = K_s \left[ 1 - \left( \frac{\theta_o}{\theta_s} \right)^\eta \right] \quad \text{Ec. 11}$$

Al despejar  $K_s$ , genera la ecuación utilizada en el presente estudio en el cálculo de de la conductividad hidráulica a saturación (Findeling, 2001):

$$K_s = \frac{\alpha_t}{\alpha_s} \left[ 1 - \left( \frac{\theta_o}{\theta_s} \right)^\eta \right]^{-1} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde  $K_s$  es la conductividad hidráulica ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $\theta_o$  y  $\theta_s$ , son las humedades inicial y a saturación ( $\text{m m}^{-3}$ ) respectivamente, siendo estimada la primera en campo y la segunda mediante la relación (Haverkamp *et al.*, 1990):

$$\theta_s = n_s f(m, M) \quad \text{Ec. 13a}$$

$$n_s = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad \text{Ec. 13b}$$

Donde  $n_s$  es la porosidad del suelo,  $\rho_d$  es la densidad aparente del suelo ( $\text{g cm}^{-3}$ ) y  $\rho_s$  es la densidad real de los sólidos ( $\text{g cm}^{-3}$ ),  $f(m, M)$  representa una función de la textura dada por  $2^{m-M}$ , con  $M$  como parámetro de normalización del diámetro de las partículas constituyentes del suelo y  $m$  parámetro de forma adquirido a partir de las funciones de transporte en el suelo (Haverkamp *et al.*, 1990).

### **Análisis de la Información.**

**Tendencia central.** Se realizaron pruebas de tendencia central clásicas, para determinar los coeficientes promedio de infiltración y escurrimiento y fijar las tendencias medias de los parámetros físicos de superficie.

Se estimaron las variaciones de dichos promedios (desviación estándar y

coeficiente de variación) para analizar la variabilidad de los valores medios.

En el caso de las propiedades hidráulicas del suelo, particularmente para estimar los valores de  $\alpha_t$  y  $\alpha_i$  en el proceso de infiltración *in situ*, se realizaron ajustes de regresión logarítmica mediante el método inverso, SOLVER en Excel. Este proceso involucra las variables de lámina de infiltración acumulada como variable dependiente (Y), y los valores de tiempo acumulado como variable independiente (X). El modelo de ajuste de regresión exponencial para la obtención de estos parámetros de forma de la curva de infiltración esta dado por la ley analítica del proceso de infiltración (De Condapa, 2000):

$$\alpha_i I = \alpha_y T + \ln(1 + \alpha_i I)$$

A partir del cual se obtiene la relación que se grafica y se ajusta:

$$T = \frac{\alpha_i T + \ln(1 + \alpha_i I)}{\alpha_i}$$

Donde  $\alpha_t$  y  $\alpha_i$ , son parámetros de forma de las curvas de infiltración ajustadas a los valores adquiridos en campo ( $s^{-1}$ ,  $m^{-1}$ , respectivamente); I y T son sucesivamente la lámina de infiltración y el tiempo transcurrido del experimento (m, s).

**Análisis de componentes principales (ACP).** Con el propósito de detectar grupos y tendencias entre las variables de medición y las calculadas, en una primera etapa se realizó un ACP con el programa SAS para el total de los sitios de la cuenca (tres sitios de la cuenca alta y dos de la cuenca media). Una segunda etapa, comprendió un ACP que incluyó por separado los sitios de la parte alta y de la parte media, lo que permitió analizar los grupos detectados en

el primer ACP, donde se observó la agrupación de suelos con mantillo y con costra. Se utilizó una matriz de datos de entrada con los valores de variables y propiedades físicas del suelo, así como de la presencia de vegetación y mantillo en cada uno de los sitios de estudio.

Para la parte alta de la cuenca, se hizo una corrida de ACP incluyendo las 15 parcelas de bosque (de los sitios 1, 2 y 3) y las tres parcelas de pastizal abierto (del sitio tres). En el caso de la parte media, se consideraron los valores de variables de 12 parcelas: seis parcelas del sitio 4 de este trabajo y seis parcelas del sitio 1 – Rio Chico- del trabajo de Sánchez-Rodríguez (2006), que se desarrolló en este mismo contexto de investigación. El proceso e interpretación de análisis de componentes principales es el mismo que utilizó Reyes- Gómez (1998).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### **Aptitudes de Infiltración y Ecurrimiento.**

En el Cuadro 1, se muestran los valores medios de la capacidad de escurrimiento e infiltración de los suelos en la cuenca del Río Conchos. Puede observarse que los valores de escurrimiento más elevados se presentaron en los sitios de la parte media de la cuenca del Río Conchos (sitios 4 y 5); contrariamente, los sitios donde se observaron valores más bajos de coeficiente de escurrimiento ( $Ke$ ) fueron los de la cuenca alta, correspondientes a la zona de bosque (sitios 1, 2 y 3). Los promedios generales de infiltración, muestran que los sitios de la cuenca alta son los más aptos para permitir el paso del agua (sitios 1, 2 y 3 con valores  $> 58 \%$ ). Un efecto consistente con estos resultados, se observa cuando la precipitación ocurre sobre el suelo saturado, por lo que la infiltración tiende a reducirse, el escurrimiento a incrementarse; en la mayoría de los sitios, el valor de  $Ke$  fue mayor en estado inicial húmedo del suelo (Gráfica 1) lo cual coincide con los estudios hechos en otros sitios y con diferentes metodologías por Reyes-Gómez, 1996; Casenave y Valentín, 1989.

### **Diferenciación de Grupos Hidrodinámicos de Suelos.**

El efecto de los elementos de superficie del suelo sobre las aptitudes hidrodinámicas, se pudieron determinar mediante un Análisis de Componentes Principales (ACP, corrido en SAS -©), considerando además de los valores  $Ke$  y  $Ki$ , la presencia de mantillo, grava, piedras, costras, rugosidad y de mejor calidad para nuestro propósito, fue entre el componente uno (CP1) y el

CUADRO 1. ESTADÍSTICAS BÁSICAS DE LAS APTITUDES DE INFILTRACIÓN ( $K_i$ , %) Y DE ESCURRIMIENTO ( $K_e$ , %).

Sitios	Aptitudes (%)	$\bar{X}$		Ds		C.V.	
		S	H	S	H	S	H
1	Ke	37.23	42.98	33.18	34.64	0.89	0.81
1	Ki	62.77	57.02	33.18	34.64	0.53	0.61
2	Ke	26.34	37.80	27.01	39.51	1.03	1.05
2	Ki	73.66	62.20	27.01	39.51	0.37	0.64
3	Ke	17.06	23.82	11.27	20.49	0.66	0.86
3	Ki	82.94	76.18	11.27	20.49	0.14	0.27
4	<b>Ke</b>	<b>56.21</b>	<b>71.22</b>	5.26	5.98	0.09	0.08
4	Ki	43.79	28.78	5.26	5.98	0.12	0.21
5	<b>Ke</b>	<b>40.23</b>	<b>60.24</b>	8.85	18.33	0.22	0.30
5	Ki	59.77	39.76	8.85	18.33	0.15	0.46

$\bar{X}$  = Valor promedio.

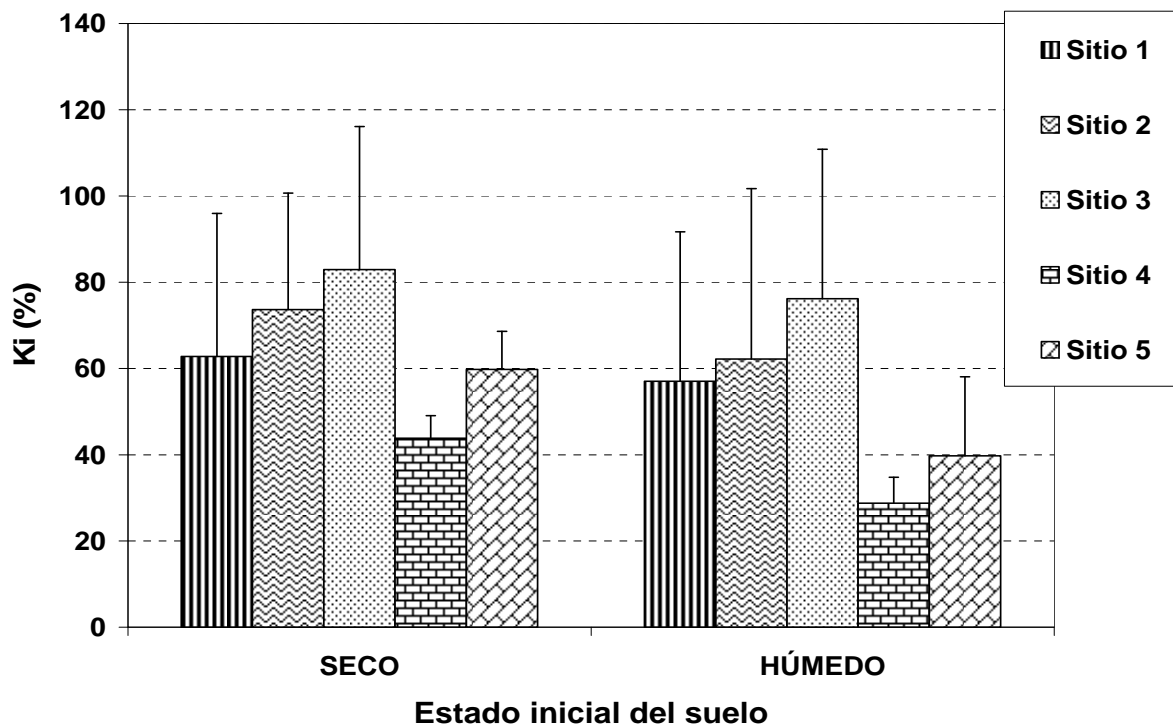
Ds = Desviación estándar;

C.V. = Coeficiente de Variación;

S = Estado inicial seco del suelo (n = 6);

H = Estado inicial húmedo del suelo (n = 6).

En negritas los valores más elevados de Ke

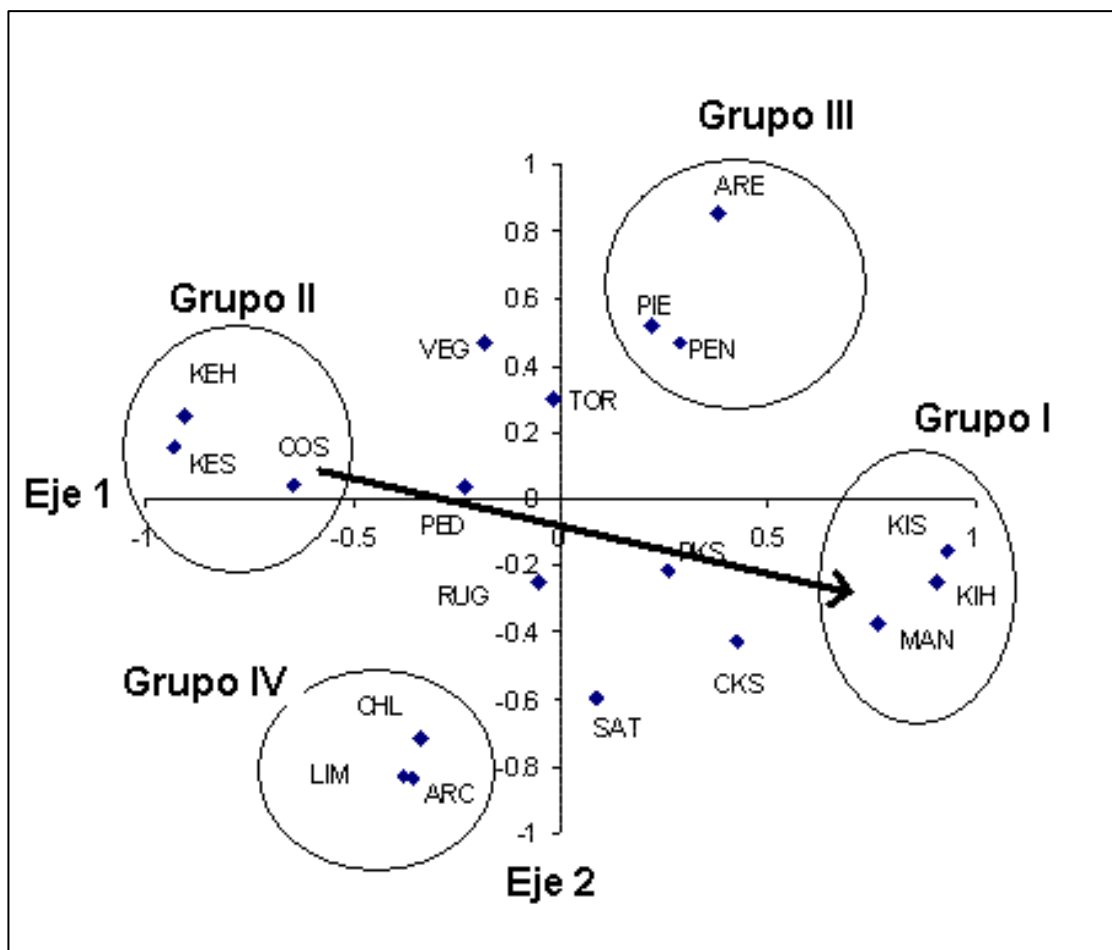


Gráfica 1. Valores medios del coeficiente de infiltración (Ki).  
Las barras superiores corresponden al valor de la desviación estándar.

componente dos (CP2); tortuosidad (valores porcentuales). También, se tomaron en cuenta los contenidos texturales, pendiente del terreno, vegetación dentro de parcelas y los valores de  $K_s$  obtenidos por el método Beerkan. Los datos totales reflejaron varianzas acumuladas de los autovalores de aproximadamente 65 % en los tres primeros componentes principales. De las combinaciones entre componentes para visualizar grupos.

En la Gráfica 2 se observa la proyección de los elementos ordenados en los CP1 y CP2. En el Eje 1, los elementos se distribuyen con relación a sus propiedades hidrodinámicas del suelo y sobre el EJE 2, con relación a sus contenidos texturales. Los valores de los ejes permiten separar en polos positivos o negativos la distribución de los elementos del ACP; entre más se reflejen de forma separada en esos polos, más posibilidad existe de encontrar grupos de individuos o variables con propiedades semejantes que las distinguan de entre los grupos del polo opuesto.

Sobre el Eje 1, se proyectan los elementos que muestran un acercamiento de propiedades hidrodinámicas; por ejemplo, mediante los coeficientes de infiltración y escurrimiento ( $K_i$ ,  $K_e$ , respectivamente), además por tipo de estado de superficie del suelo (mantillo = MAN, o costra = COS), se pueden separar dos grupos uno que se proyecta en el polo positivo y que corresponde a suelos con altas aptitudes de dejar entrar agua en el suelo (Grupo I); contrariamente a los elementos proyectados en el polo negativo (Grupo II, señalados con KE y COS), muestran el conjunto de suelos con aptitudes de producción de escurrimientos asociados a superficie encostrada o sin vegetación.



Gráfica 2. Plano de componentes principales 1 vs 2. Parámetros físicos e hidrodinámicos del suelo superficial en la parte alta y media de la cuenca del Río Conchos.

KES, KEH = Coeficiente de escurrimiento en suelo seco y húmedo respectivamente;  
 KIS, KIH = Coeficiente de infiltración en suelo seco y húmedo respectivamente;  
 ARE, LIM, ARC = Contenidos de arena, limo y arcilla respectivamente;  
 COS = Costra; MAN= Mantillo; TOR, RUG = Tortuosidad y rugosidad respectivamente;  
 PIE = Piedras unidas al suelo; PED = Pedregosidad en muestras > 2 mm;  
 PKS, CKS, CHL = Conductividad hidráulica por lluvia, Beerkan y laboratorio, respectivamente,  
 PEN = pendiente, VEG = % de vegetación; SAT= Promedio de infiltración a régimen permanente con simulación de lluvia.

Este ordenamiento de variables y n eventos de lluvia, permitió visualizar claramente el efecto de la superficie del suelo cubierta con mantillo (como en el bosque) y del suelo provisto de costras superficiales, como en el caso de suelos de zonas de cultivos, pastizales ó bosques desmontados, en ambas cuencas (alta y media) del Río Conchos.

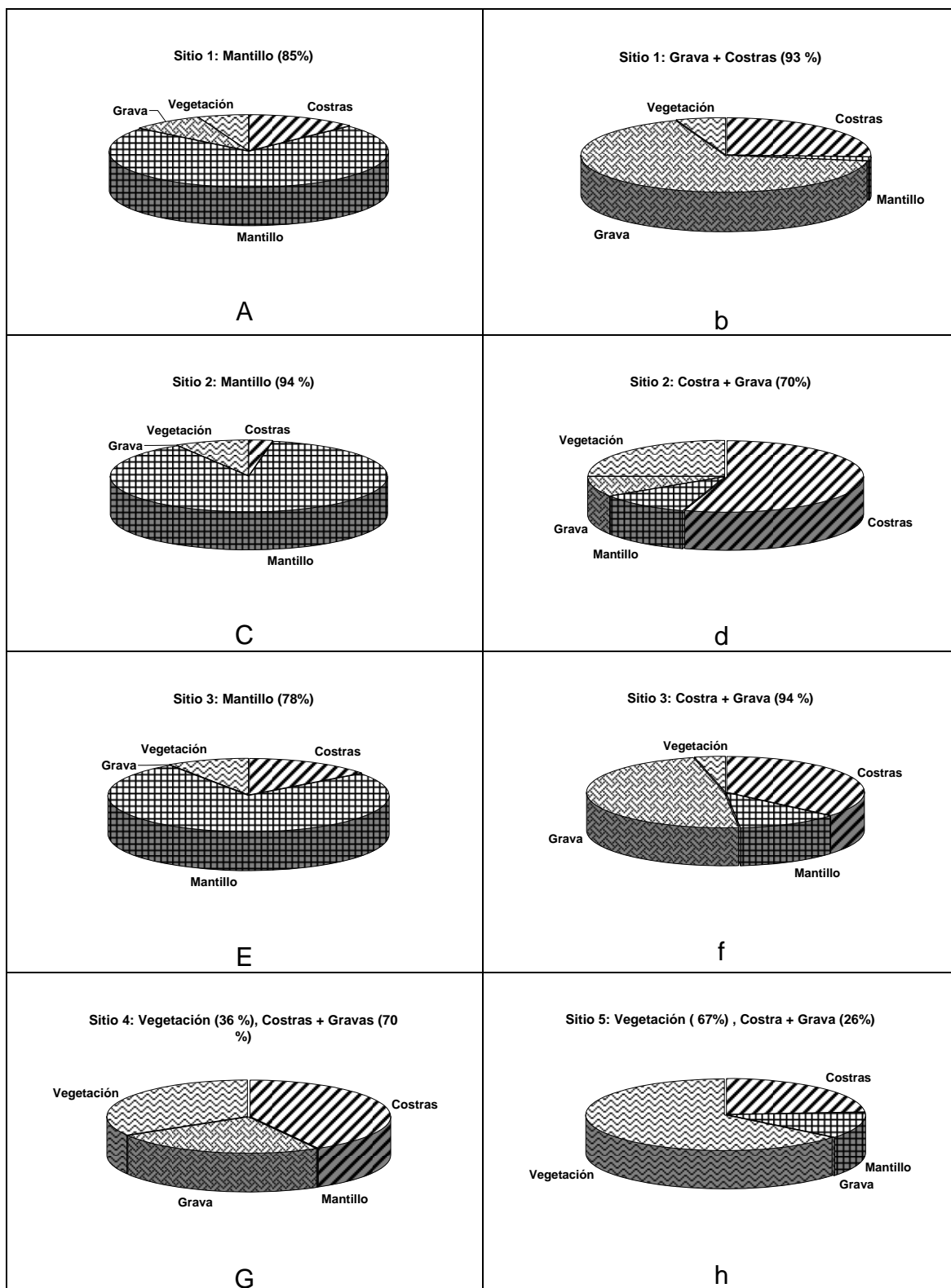
La mejor correlación obedece para el primer componente, fue entre el coeficiente de escurrimiento (KES y KEH, medidos in situ) y la presencia de mantillo (MAN) ó ausencia este (suelo encostrado –COS-). En el caso de suelo cubierto con mantillo, la correlación con el escurrimiento resultó negativa, es decir, a mayor cantidad de mantillo, menor será el escurrimiento que se genera en el suelo; en un suelo cubierto por costras, la correlación se mostró positiva, es decir, a mayor cantidad de costra, mayor será el coeficiente de escurrimiento en el suelo. Estas correlaciones se visualizan con el sentido de la flecha de la Grafica 2, que va del Grupo II al Grupo I.

En el caso de los grupos según el eje 2, la separación obedece más a los contenidos de arena (ARE), pedregosidad (PIE) y partículas más finas como es el caso del limo (LIM) y la arcilla (ARC): se distingue un grupo superior con mayores contenidos de arena y piedra (Grupo III, polo positivo), alejado de otro grupo donde está presente la arcilla (Grupo IV, polo negativo). Esta separación tiene sentido, no obstante, los valores observados en texturas no permitieron ver estos efectos debido a que todos los suelos corresponden a un mismo tipo textura (areno-arcillosos).

**Efecto de la superficie del suelo sobre la infiltración.** Los porcentajes de los componentes de la superficie del suelo se presentan en la Gráfica 3. En la zona

alta de la cuenca del Río Conchos, el suelo puede estar predominantemente cubierto por mantillo o desprovisto de él cuando por uso del suelo, el bosque es desmontado (sitios 1, 2 y 3). En los casos donde el bosque presenta vegetación arbórea tipo pino-encino-cedro, el suelo está cubierto con 80 - 94 % por mantillo (gráficas 3a, 3c y 3e); mientras que en zonas con uso de suelo agrícola, ganadero ó simplemente desmontado, el suelo está cubierto en general por costras y grava (70-94 %, gráficas 3b, 3d y 3f), ó vegetación herbácea (pastos con coberturas de menores a 15%). En la cuenca media del Río Conchos, se aprecian paisajes de tipo pastizal, donde el suelo está cubierto por herbáceas como pastizales (con degradación moderada); sus tasas de cobertura varían entre 30 y 70 % (gráficas 3g y 3h), estas zonas cubiertas de pastos se asocian con costras, algunas veces a mantillo proveniente del mismo pasto y a presencia de grava.

El impacto del estado superficial del suelo, en la interfase suelo-lluvia-infiltración-escurrimiento está bien demostrado sobre todo en zonas áridas y semiáridas de diversas partes del mundo (Casenave y Valentin, 1989; Asseline y Valentin, 1978; Reyes-Gómez, 1996; Warren, 2001a). En este trabajo se pone en evidencia el papel del bosque y el efecto de los cambios de usos del suelo sobre las aptitudes de infiltración y escurrimiento, tal como se puede ilustrar en la Gráfica 4 donde se aprecia que al separar los sitios cubiertos con hojarasca de aquellos desprovistos de ella, se observó que los porcentajes mayores de infiltración se presentaron en sitios donde el mantillo predomina (*Ki* promedios entre 90 y 98%, barras marcadas como SI-M, S2-M, S3-M en la Gráfica 4) ó cuando la vegetación cubre más de 50 % de la superficie



Gráfica 3. Relación promedio de los estados de superficie del suelo con mantillo y suelos encostrados con grava.

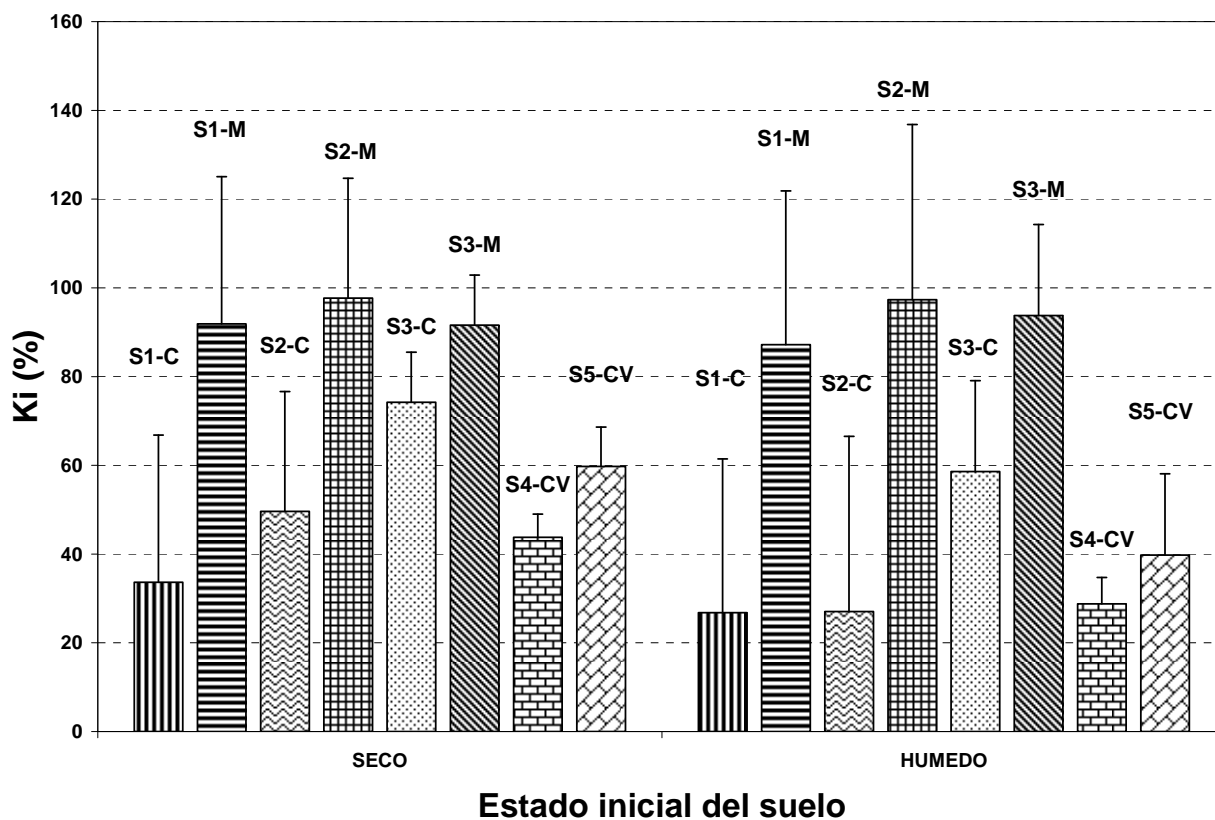


Gráfico 4. Promedio de las aptitudes de infiltración en sitios de estudio, separando suelo cubierto con mantillo y desprovistos de mantillo en los sitios 1, 2 y 3.

S1-C = Sitio uno, con suelo encostrado.

S1-M = Sitio uno con suelo cubierto con mantillo.

S2-C = Sitio dos encostrado.

S2-M = Sitio dos con mantillo.

S3-C = Sitio tres encostrado.

S3-M = Sitio tres con mantillo.

S4-CV = Sitio cuatro con suelo cubierto por costra dominante y algo de vegetación.

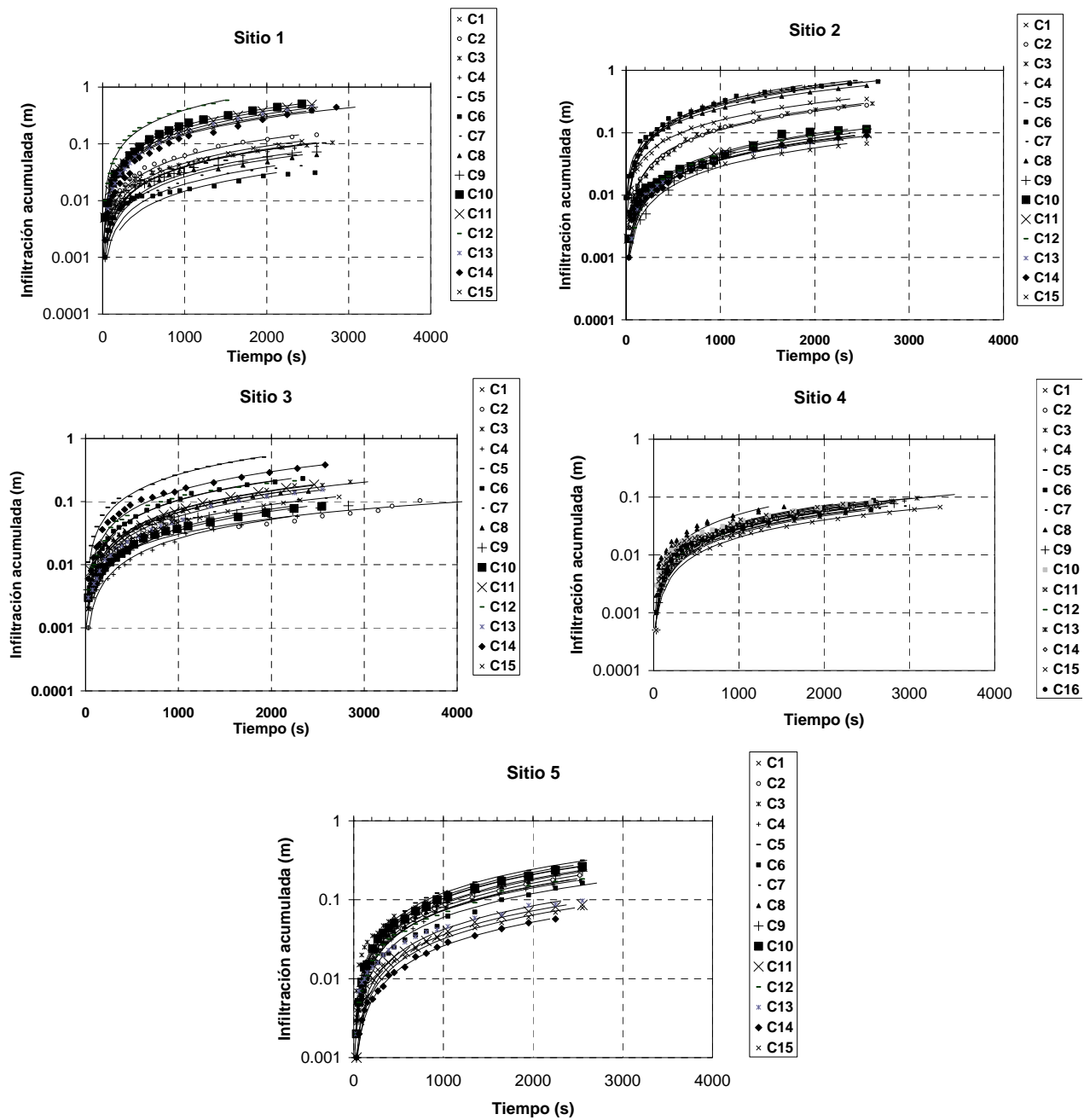
S5-CV = Sitio cinco cubierto con vegetación y algo de suelo encostrado.

( $K_i$  cercanos al 60 %, barra marcada con S5-CV). Contrariamente, se observa que en suelos donde el mantillo está ausente o cubriendo parcialmente la superficie, los valores de  $K_i$  son menores, en algunos casos menos del doble de los observados en suelos cubiertos de hojarasca ( $K_i$  entre 30 y 45 %, barras marcadas como S1-C, S2C, S4-CV). Los suelos encostrados y con grava unida al suelo, reflejaron siempre las mejores aptitudes de producción de escurrimiento ( $K_e > 60$  %). No obstante, no se presentan los valores de cada punto de simulación de lluvia, se observaron sitios donde la hojarasca (mantillo) cubre toda la superficie y el escurrimiento superficial fue nulo.

#### **Proceso de Infiltración: Suelo con Mantillo y sin Mantillo.**

En la Gráfica 5 se aprecia la evolución de la infiltración acumulada obtenida por el método Beerkan, son las 15 curvas correspondientes a las repeticiones por sitio. La evolución general de las curvas sigue un patrón muy similar: un ascenso brusco en los primeros 15 min, seguido de una disminución de la infiltración reflejada en la forma asíntota de la curva.

Esta forma característica de curvas en distintos tipos de suelos fue la esperada y configuración similar a la descrita por otros autores (Haverkamp *et al.*, 1994; Chérif *et al.*, 2004). Si se analiza la primera fase de infiltración, se observa que en sitios donde el suelo está cubierto por mantillo ó vegetación, existe mayor infiltración, alcanzando láminas de 0.015 a 0.045 m durante los primeros 2 min (casos de las curvas superiores del sitio 1, 2 y 3), mientras que en suelos sin hojarasca ó vegetación escasa, en ese mismo tiempo sólo se acumula hasta un máximo de 0.01 m. A los 8 min ya se pueden apreciar láminas entre 0.08 y 0.17 m para suelos con mantillo y entre 0.015 y 0.05 para



Gráfica 5. Evolución de la infiltración (método Beerkan). C1- C15, número de repeticiones por sitio. Las curvas sólidas son los ajustes para obtención de  $\alpha_i$  y  $\alpha_t$ .

los otros tipos de superficie. Las diferencias más notables se aprecian a los 15 min cuando las láminas en suelos de bosque alcanzan valores máximos de 0.4 m y en suelos desprovistos de vegetación, valores máximos de 0.12 m.

En la segunda fase (después de los 16 min), en todos los casos se aprecia una distribución asíntota de la curvas, lo que indica que el suelo está próximo al estado de equilibrio hidrodinámico, lo que implica una cantidad mínima de infiltración, como se refleja en esa curva, correspondiente al drenado interno en los frentes de infiltración de las capas no saturadas y ó el drenaje horizontal. Lo que refleja esta propiedad, es la capacidad máxima del suelo al permitir entrar el agua debido a que se puede asumir que el suelo superficial en ese punto, está saturado (Haverkamp *et al.*, 1994).

Similar a las lluvias mediante infiltración controlada, los resultados muestran que esa capacidad de infiltración es mayor en suelos cubiertos con mantillo; los valores obtenidos, reflejaron láminas acumuladas mayores de 50 cm (curvas superiores en los sitios 1, 2 y 3); la infiltración total en sitios donde el suelo esta desprovisto de mantillo o cubierto por costras o poca vegetación, alcanzó valores máximos en infiltración de menos de 10 cm (curvas del sitio 4 y las otras similares del sitio 2 y 5). Esta evolución de las curvas de infiltración, indica que el suelo de bosque cuando es cambiado a uso agrícola o ganadero puede perder aptitudes de dejar pasar el agua y con ello muy probablemente pérdida de agua por escurrimiento y de suelos que están desprotegidos, es decir, puede no presentarse una recarga.

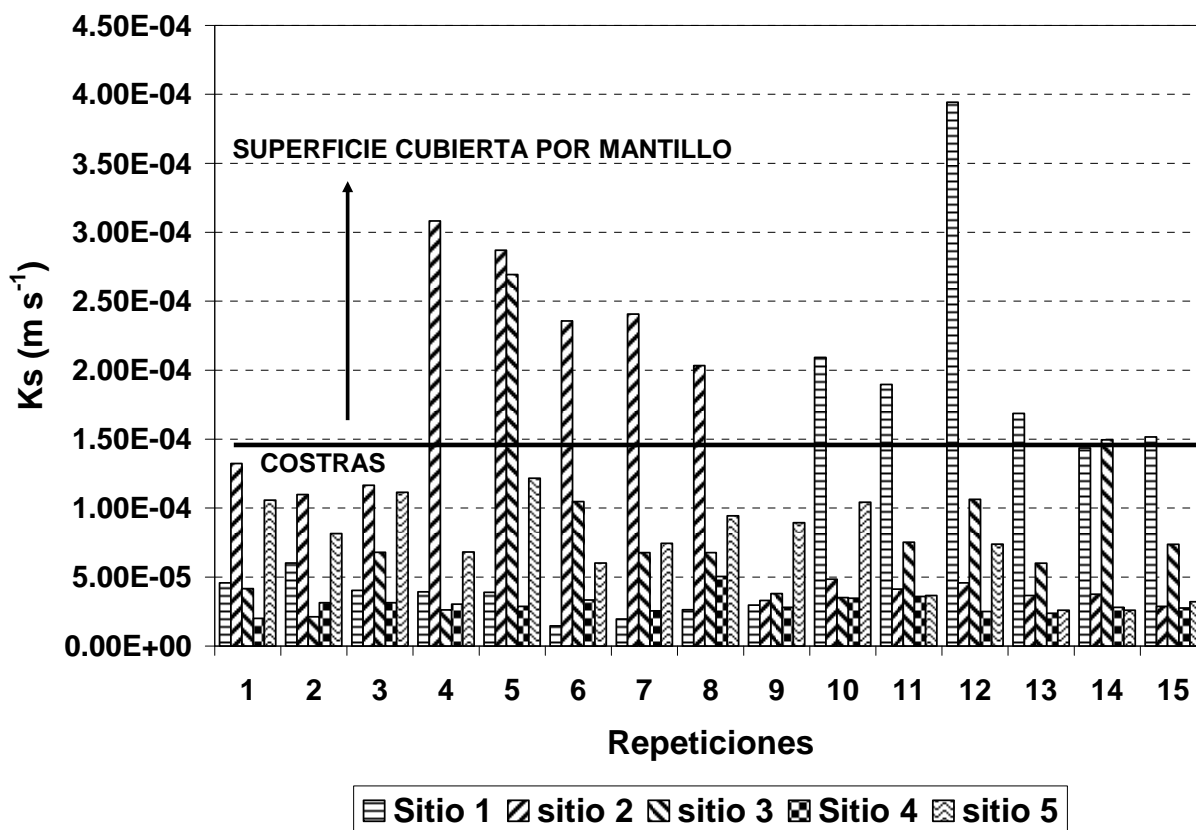
Estos resultados permiten plantear el escenario hipotético de que un bosque cuando es desmontado puede perder hasta cuatro veces su función de

recarga hídrica cuando es manejado inadecuadamente (Sánchez, 2006). Si se trata de suelos de pastizal natural (sitio 5), la infiltración puede considerarse elevada (25 cm), pero se verá modificada si el sistema de pastoreo se vuelve excesivo como se puede apreciar en las curvas inferiores, correspondientes a suelos donde el ganado está presente ó la cobertura vegetativa es escasa; donde los valores máximos pueden llegar solamente a los 10 cm.

Un efecto de compactación del suelo por pisoteo de ganado, puede producir reducción en la capacidad de infiltración de dichas zonas, sin embargo, la literatura al respecto es escasa; es más común encontrar estudios sobre erosión del suelo por pérdida de su estructura superficial, debida al pisoteo ejercido por el paso del ganado. Algunos estudios muestran que cuando la estructura del suelo superficial no se modifica no hay cambios en las láminas de infiltración ni en la producción de sedimentos (Eldridge, 2001).

### **Conductividad Hidráulica ( $K_h$ ).**

En la Gráfica 6, se muestran los valores de conductividad hidráulica más elevados se presentaron en los sitios 1, 2 y 3 ( $K_s > 1.50E-04 \text{ m h}^{-1} = 54 \text{ cm h}^{-1}$ , señalados en la parte superior de la línea gruesa (Gráfica 6), estos valores corresponden a suelos de zona de bosque, sobre todo en casos donde el suelo está cubierto por capas de hojarasca de pino-encino-cedro (mantillo con espesores entre 8 y 10 cm). La capacidad del suelo en bosque arbóreo para permitir la infiltración de agua, es constatada por otros métodos a escalas de cuencas para suelos de bosque en Durango, en la zona que forma parte de la misma cadena montañosa de la parte alta del Río Conchos, pero con otros métodos (Viramontes *et al.*, 2002).



Grafica 6. Valores de la conductividad hidráulica en cada uno de los 15 puntos de repetición en los cinco sitios de estudio.

En los suelos cubiertos por vegetación herbácea como el pastizal (Sitio 5, cubierta vegetal > 50 %), los valores de conductividad hidráulica, mostraron una amplitud similar a los suelos en zonas de bosque desprovistos de árboles, en las cuencas alta y media del Río Conchos ( $K_s$  entre 18 y 54  $\text{cm h}^{-1}$ ). Los valores más bajos de la conductividad hidráulica, se observaron en los suelos del sitio 4 y algunas parcelas del Sitio 1 donde el suelo está desprovisto de vegetación y fuertemente compactados ( $K_s < 18 \text{ cm h}^{-1}$ ); estos resultados coinciden con los encontrados por varios autores (Reyes-Gómez, 2005; Belnap, 2001) quienes afirman que las zonas áridas y semiáridas con matorral xerófilo donde el suelo está cubierto en menor grado por herbáceas (sitios 1, 2, 3 en zona fuera de bosque y sitio 4), sin embargo, con una fuerte presencia de costras biológicas y o minerales, el suelo superficial adquiere una propiedad hidrofóbica que limita la entrada del agua al mismo.

Este efecto puede ser benéfico al suelo, en sentido inverso, ya que al humedecerse, la evaporación también se reduce en suelos cubiertos por costras biológica (Eldridge, 2001; Warren, 2001). En este trabajo, no se estudió el efecto hidrofóbico de las costras biológicas asociadas a cianofíceas y líquenes; sin embargo los bajos valores de conductividad hidráulica en suelos encostrados, reflejan el “impedimento” del paso del agua de infiltración de esos suelos, pudiendo alcanzar valores cinco veces menor que en los suelos de bosque ( $K_s < 9 \text{ cm h}^{-1}$ ).

## CONCLUSIONES

- 1) Los resultados del presente estudio, permite que la reproducción de lluvia como la infiltración controlada (*in situ*), pueden ser dos metodologías que permitan cuantificar en sitios representativos de un ecosistema los aportes de agua de recarga que ofrece el bosque y los que pudieran perderse cuando el cambio de uso de suelo de bosque no es el más adecuado.
- 2 ) Mediante la simulación de lluvia, se constataron las aptitudes de producción de escurrimiento e infiltración de suelos en la cuenca alta y media del Río Conchos.
- 3) Se pudo poner en evidencia de forma cuantitativa, que los suelos de bosque cubiertos por vegetación arbórea y en presencia de mantillo, presentan aptitudes de infiltración mayores al 60 %; contrariamente, cuando el bosque es desmontado y en abandono, las aptitudes de infiltración se reducen a 50 % y la habilidad de producir escurrimiento puede traducirse en pérdida de agua de recarga, logrando producir escorrentías de hasta 95 % en suelo saturados superficialmente.
- 4) Con el método Beerkan de infiltración controlada *in situ*, y la adquisición de algunos parámetros texturales del suelo, se puede remontar en sentido inverso para calcular el valor de las propiedades hidráulicas más importantes del suelo (el valor de  $K_s$ ), que se fundamenta teóricamente en el modelo de Brooks y Corey (mediante adimensionalización de la infiltración). El ajuste de la infiltración *in situ* sirve para la obtención de parámetros de tiempo e infiltración adimensionales ( $\alpha_t$  y  $\alpha_i$ ), el muestreo simple de suelos permite adquirir los

parámetros de forma textural y de conductividad de agua dentro del suelo ( $n$ ,  $m$ ,  $\eta$ ), de porosidad y humedad ( $n_s$ ,  $\theta_o$  y  $\theta_s$ ), pudiendo llegar a calcular los valores de  $K_s$ .

5) Los resultados de esta propiedad hidráulica de los suelos por este método, ilustran las mejores tasas de infiltración en suelos de bosque y en la parte media de la cuenca del río Conchos. Se puso en evidencia de forma cuantitativa que un suelo de bosque cubierto por mantillo (hojarasca) puede representar una zona de recarga, con tasas de infiltración de agua de lluvia arriba de  $50 \text{ cm h}^{-1}$ , y que esta propiedad puede disminuirse hasta cinco veces cuando ese mismo suelo es desprovisto de vegetación arbórea y manejado inadecuadamente o abandonado.

6) Además, se puso en evidencia que un suelo cubierto por vegetación herbácea, como en la zona de pastizales en la cuenca media del Conchos, las tasas de infiltración pueden fluctuar entre  $18$  y  $50 \text{ cm h}^{-1}$ , mientras que en suelos de matorral xerófilo, cubiertos por costras biológicas y o minerales, las tasas de infiltración difícilmente llegan a los  $10 \text{ cm h}^{-1}$ .

7) Las dos metodologías aplicadas, resultaron útiles para determinar el papel de la interfase suelo-estados de superficie-vegetación sobre las funciones hidrológicas de bosque en la cuenca del Río Conchos.

## LITERATURA CITADA

- Abortes-Aguilar, L. 2002. Hacia una Historia del Río Conchos. CIESAS, Cd. Juárez, Chihuahua: 5-6 p.
- Asseline, J. y Valentin C. 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre á aspersion. Cah. ORSTOM, ser. Hydrol. Vol. 15. Núm (4): 321-350 p.
- Belnap, J. B. Büdel y O.L. Lange. 2001. Biological Soil Crust: Characteristics and Distribution. P. 3-30, *in: Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Belnap J., O.L. Lange (edits). SPRINGLER, ISBN 3-540-41075-9, New York, U.S.A. Vol (3): 503 p.
- Brooks, R.H. y Corey, T., 1964 Hydraulic properties of pores media. Hydrology Papers. Fort Collind: Colorado State University. 3-4 p.
- Carreón, H.E., C. Pinedo y A. Lafón. 2001. Aplicación de la tecnología geoespacial en el estudio de cuencas: Caso río Conchos. XI Congreso Nacional de Irrigación, Simposio 5. Manejo Integral de Cuencas. Guanajuato, Gto, México. 150-155 p.
- Casenave, A. y C Valentin. 1989. Les états de surface de la zone Sahélienne : Influence sur l'infiltration". IRD, Paris, France, 1989, 229 p.
- Chérif, R., J. Robert y R. Lagace. 2004. Optimisation des parametres Green et Ampt pour modele conceptuel pluie-infiltration-ruissellement. Canadian Biosystemes Engineering. Vol. (46): 14-17 p.
- CNA. 2001a. Comisión de Cuenca del Río Conchos. Diagnóstico Versión 1.0 Gerencia Estatal Chihuahua, Chihuahua, México: 36-37 p.
- CNA. 2001b. Programa Nacional Hidráulico 2001-2006 Méx.
- Conabio. 2006. Cuenca alta del río Conchos y río Florido. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. Disponible: [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalización/doctos/rhp\\_039.html](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalización/doctos/rhp_039.html).
- Decondapa. 2000. Illustration de la méthode Beer-Kan en vue de la caractérisation hydrodynamique d'un sol. DEA, Grenoble INPG, Francia. 43 p.
- Descroix, L., D. Viramontes, M. Vauclin, M. González-Barrios, J.L. Esteves. 2001. Influence of surface features and vegetación on runoff and soil erosion in the western Sierra Madre (Durango, North West Mexico). Catena, Vol. 43, Num (2): 115-135 p.

- Eldridge, D.J. 2001. Biological Soil Crusts and Water Relations in Australian Deserts. P. 314-325, in: *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Belnap J., O.L. Lange (edits). SPRINGLER, ISBN 3-540-41075-9, New York, U.S.A. 503 p.
- Findeling, A. 2001. Etude de la modelisation de certains effets du semis direct avec paillis de residus sur les bilan hydrique, thermique et azote de une culture de maïs pluvial au Mexique. These Docteur Montpellier, Ecole Nationale du Genie Rural de Eaux et Forets: 355 p.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Green, W.H y G. Arpt. 1911. Studies in soil physic: the flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, Vol. (4): 1-24 p.
- Grünberger, O. y J.L. 2005. Janeau Geoquímica de las lluvias, de las aguas de escurrimiento e infiltración de los suelos. P. 100-112, In: *Las Playas del Desierto Chihuahuense (Parte Mexicana)*, influencia de las sales en medio ambiente árido y semi-arido. Grünberger O., V.M. Reyes Gómez y J.L. Janeau (Eds.) ; IRD- INECOL. ISBN: 970 709 048 0, 350 p.
- Haverkamp, R., J. Parlange., J. Starr., G. Scmitz. y C. Fuentes. 1990. Infiltration under pouted conditions: 3. a predictive equation based on physical parameters. *Soil Science*. Vol. 149. Núm (5): 292-300 p.
- Haverkamp, R., P. Ross, K.R.J.Smettem y J.Y.Parlange. 1994. Tree-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. Physically based infiltrattion equation. *Water Resources Research*, 1994, vol. 30, núm. 11, 2931-2935 p.
- Hillel, D. 1980. *Fundamental of Soil Physics*. Chap. 8: Flow of water in saturated Soil. AP, San Diego, New York, USA. 5-46 p.
- Nelly, M.E. 2001. El río Conchos: un informe preliminar. Texas Center for Policy Studies. Austin, Texas. 5-33 p.
- Reyes-Gómez, V.M. 2005. Hidrodinámica superficial de los suelos de playa, pp 79-91 en: *Las playas del desierto chihuahuense (parte mexicana)*, influencia de las sales en medio ambiente árido y semiárido. GrünbergerO., Reyes-Gómez V.M., J.L. Janeau (editores), IRD-INECOL : 350 p.
- Reyes-Gómez, V.M., Grünberger y J.L Janeau. 1996. Hidrodinámica en el suelo de un pastizal en una zona árida del norte de México. *TERRA*. Vol. 14. Núm. (2), 129-136 p.

- Sánchez, P.B. 2006. Caracterización hidrodinámica del suelo superficial en la cuenca media y baja del río Conchos. Tesis de licenciatura, Facultad de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Van Genuchten M.TH. 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal.*, vol. 42, 892-898 p.
- Viramontes, D. L. Descroix, A. Bollery y J. Poulenard. 2002. Comportement hydro-érosif des sols de la Sierra Madre Occidentale: Processus hydrologiques et évolution d'un milieu soumis ai la surexploitation. *Géomorphologie : relief, processus, environnement.* Vol. (3) : 239-252 p.
- Warren, S.D. Biological Soil Crusts and Hydrology in North American Deserts. 2001a. P. 327-337, In *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Belnap J., O.L. Lange (edits). SPRINGLER, ISBN 3-540-41075-9, New York, U.S.A., , 503 p.

### CAPÍTULO 3

En el presente capítulo, se hace referencia a la relación lluvia-escorrimento-infiltración-suelo-vegetación, determinando las aptitudes hidrodinámicas y la conductividad hidráulica de suelos representativos de la cuenca media y baja del Río Conchos, empleando dos técnicas *in situ* (simulación de lluvia y el método de Beerkan), en donde se evalúa la humectación inicial del suelo en presencia de vegetación y sin ella.

Los resultados generados en esta investigación, se publicaron en la Revista Latinoamericana de Recursos Naturales del Instituto Tecnológico de Sonora, donde se presentó el artículo: “Funcionamiento Hidrológico del Suelo Superficial en la Cuenca Media y Baja del Río Conchos”, con una participación del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, la Facultad de Zootecnia de la Universidad Autónoma de Chihuahua en coordinación con el Centro de Investigación Sobre Sequía (CEISS) del Instituto de Ecología A.C.

En seguida se describirán ampliamente los diversos procesos que se llevaron a cabo dentro de la investigación; calculándose el coeficiente de infiltración en las zonas estudiadas, los cuales, serán considerados en la primera validación y calibración del modelo de estimación de las escorrentías en la cuenca del Río San Pedro, Conchos (Capítulo 5).

**FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DEL SUELO SUPERFICIAL  
EN LA CUENCA MEDIA Y BAJA DEL RÍO CONCHOS,  
CHIHUAHUA**

**Por:**

**OSCAR ALEJANDRO VIRAMONTES OLIVAS**

**RESUMEN**

La relación lluvia-escorrimento-infiltración-suelo-vegetación, se utiliza para entender cuantitativamente el papel hidrológico del suelo superficial en algunos hidrosistemas que promueven la función natural y mantienen el equilibrio ecológico a favor del desarrollo sustentable de las nuevas generaciones. En este trabajo, se estimaron las aptitudes hidrodinámicas y la conductividad hidráulica ( $K_s$ ) de suelos representativos en tres sitios de la cuenca del río Conchos: Río Chico (cuenca media); El Morrión y El Pueblito, en la cuenca baja. Se utilizaron dos técnicas *in situ* (simulación de lluvia y el método de Beerkan), evaluando la humectación inicial del suelo en presencia de vegetación y sin esta. El coeficiente de velocidad de infiltración en los tres sitios (estado seco inicial del suelo) fue similar por lluvia simulada (59 %), en cambio por Beerkan, la lámina mayor de infiltración ( $> 0.1$  m) se detectó en Río Chico y 0.01 a 0.1 m para la cuenca baja. Con simulación de lluvia, la  $K_s$  en suelo seco fue similar en todas las áreas a diferencia de Beerkan, donde El Pueblito mostró la menor tasa de infiltración ( $K_s < 1.5E-05$  m s<sup>-1</sup>); seguido del Morrión ( $K_s = 5.0E-05$  m s<sup>-1</sup>) reflejando aptitudes medias de infiltración y escurrimiento a diferencia de Río Chico, donde ( $K_s > 4.0E-04$  ms<sup>-1</sup>), permitió explicar a escala

puntual un funcionamiento hidrológico del sistema con un gradiente descendente, explicado la relación suelo-vegetación (cuenca media) donde la infiltración y el escurrimiento pueden ser similares; no así en la parte baja de la cuenca, donde la infiltración es mínima y con mayor escurrimiento.

**Palabras clave:** funciones hidrodinámicas, Río Conchos, lluvia, infiltración, escurrimiento.

**Keywords:** Hydrodynamics function, Conchos river, infiltration, runoff, superficial rainfall.

# HYDROLOGICAL FUNCTIONING OF THE SUPERFICIAL SOILS IN THE CONCHOS RIVER WATERSHED, CHIHUAHUA

## ABSTRACT

The correlation among rainfall – runoff – infiltration – soil - vegetation has been used to understand quantitatively the hydrologic role of superficial soil in some hydro-systems that promote the natural function and to maintain the ecological balance in favor of sustainable development of new generations. In this work, the hydrodynamic aptitude and hydraulic conductivity ( $K_s$ ) of representative soils were determined, in three sites of the Conchos River Basin: Río Chico (Middle basin); The Morrión and El Pueblito, in the lower. Two *on site* techniques were used (Rainfall simulation and the Beerkan method), to evaluate the initial humectation of soil in presence of vegetation and without it. The infiltration coefficient on the three sites (initial dry status of soil) was similar by simulated rainfall (59%), on the other side by Beerkan, the highest infiltration sheet (> 0.1 m) was on Rio Chico and 0.01 to 0.1 for the lower part. Under rainfall simulation, the  $K_s$  on dry soil was similar in all the areas, different from Beerkan, where El Pueblito, shower the highest infiltration rate ( $K_s < 1.5E-05 \text{ m s}^{-1}$ ); followed by El Morrión, ( $K_s = 5.0E-05 \text{ m s}^{-1}$ ), which reflected medium infiltration and runoff aptitudes; different from Rio Chico, where ( $K_s > 4.0E-04 \text{ ms}^{-1}$ ), it allowed to visualize on a punctual scale an hydrological function of the system with a descending gradient, explained in the soil – vegetation relationship (middle basin) where infiltration and runoff could be similar; not as well on the lower part, where the infiltration is minimal with a higher runoff.

## INTRODUCCIÓN

La cuenca del Río Conchos, representa la más importante fuente de producción de agua para diferentes actividades dentro de zona: agropecuaria, urbana e industrial, en el estado de Chihuahua. Su principal río, cruza gran parte de la entidad, desde la Sierra Tarahumara, hasta el Río Bravo en el municipio de Ojinaga (CNA, 2001a). Actualmente, enfrenta una problemática compleja debido a diversas acciones antropogénicas: deforestación (parte alta); el sobre-pastoreo (cuenca media); sobreexplotación de acuíferos (parte baja); contaminación y cambios de uso del suelo en toda la rivera del Río Conchos; en este sentido, es importante conocer la función hidrodinámica del suelo, con el fin de contribuir en el manejo y mejoramiento de sus cuencas (Miranda, 2006).

Varios autores mencionan que los estados de superficie en los suelos, determinan la relación lluvia-escurrimiento-infiltración-suelo-vegetación (Reyes-Gómez, 2005; Cassenave y Valentín, 1988); se apoyan en métodos clásicos como el aforo de cuencas, parcelas de escurrimiento (*Es*) y erosión, encaminadas a probar hipótesis del efecto de dichos estados sobre la interfase antes mencionada. Otros procedimientos prácticos y menos costosos como la lluvia simulada y la infiltración (*In*) controlada, han sido utilizados para determinar las propiedades hidráulicas del suelo *in situ*, conocidos como *In* con carga constante de agua. Martínez-Ochoa (2007) y Alcalá de Jesús *et al.* (1998) utilizan la simulación de lluvia para caracterizar el movimiento de agua en el suelo superficial y evaluar el efecto de las precipitaciones y láminas de riego, sin tener que esperar la lluvia natural con la ventaja de aplicarlas *in situ* en

condiciones de campo como se presenta en la naturaleza. De Condapa (2000) constató que otro método (Beerkan) de infiltración controlada, permite medir la velocidad de infiltración *in situ* a través del tiempo, ayudando a determinar el valor de la conductividad hidráulica ( $K_h$ ) del suelo, propiedad ampliamente utilizada como indicadora de la capacidad de transmisión del agua en medios porosos en el subsuelo (Findeling, 2001).

En este estudio, se planteó constatar la hipótesis en que la interfase lluvia-estados de superficie-infiltración-escurrimiento, refleja la función hidrológica ambiental del suelo superficial de la cuenca del Río Conchos y con la conductividad hidráulica del suelo, se aprecia la importancia del papel que tienen los servicios hidrológico-ambientales en los primeros centímetros del suelo.

En base a lo anterior, se tienen los siguientes objetivos: Analizar la capacidad de Infiltración y escurrimiento del suelo superficial en la cuenca media y baja del Río Conchos, mediante el método de simulación de lluvia, así como y calcular el valor de la conductividad hidráulica ( $K_h$ ) a través del Método Beerkan.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del Área de Estudio.

Se realizó en la cuenca del Río Conchos, en el estado de Chihuahua; se encuentra dentro de la Región Hidrológica 24 Río Bravo (CNA, 2001b) dividiéndose en cinco subcuencas: Río Conchos, San Pedro, Florido, Conchos-Ojinaga, Conchos-La Boquilla, con una superficie de 68, 387 km<sup>2</sup> (Carreón *et al.*, 2001) que representa 30.2 % de la superficie del estado; forma parte de la cuenca del Río Bravo, ocupando 14 % del área total de la misma con altitudes desde 2,348 m en la parte alta donde inicia el río del mismo nombre (municipio de Bocoyna) que recorre 850 km hasta unirse al Río Bravo en la cuenca baja a 841 msnm (municipio de Ojinaga); cuenta con una diversidad de climas, siendo los predominantes el templado en la parte alta, el semiárido en la cuenca media y el árido en la parte baja (Aboites-Aguilar, 2002).

Adaptando la nomenclatura de la fisiografía propuesta por INEGI (1988) a la cuenca del Río Conchos en su parte alta, corresponde a una zona montañosa; la media, al altiplano o valles centrales y la cuenca baja a la región árida. En la Figura 9 se presentan los tres sitios experimentales (puntos negros) que corresponden a zonas representativas. Para la cuenca media, se seleccionó el Sitio Río Chico, con áreas de pastizal utilizadas en la ganadería extensiva en el Valle de Balleza, dominado por lomas de conglomerado del Terciario y suelos de tipo Regosol, Faeozem, Cambisol; en la parte baja, se eligieron dos sitios: El Morrión y El Pueblito, en el primero con matorral xerófilo sobre una zona de pie de monte en un afloramiento de caliza del Cretácico y el

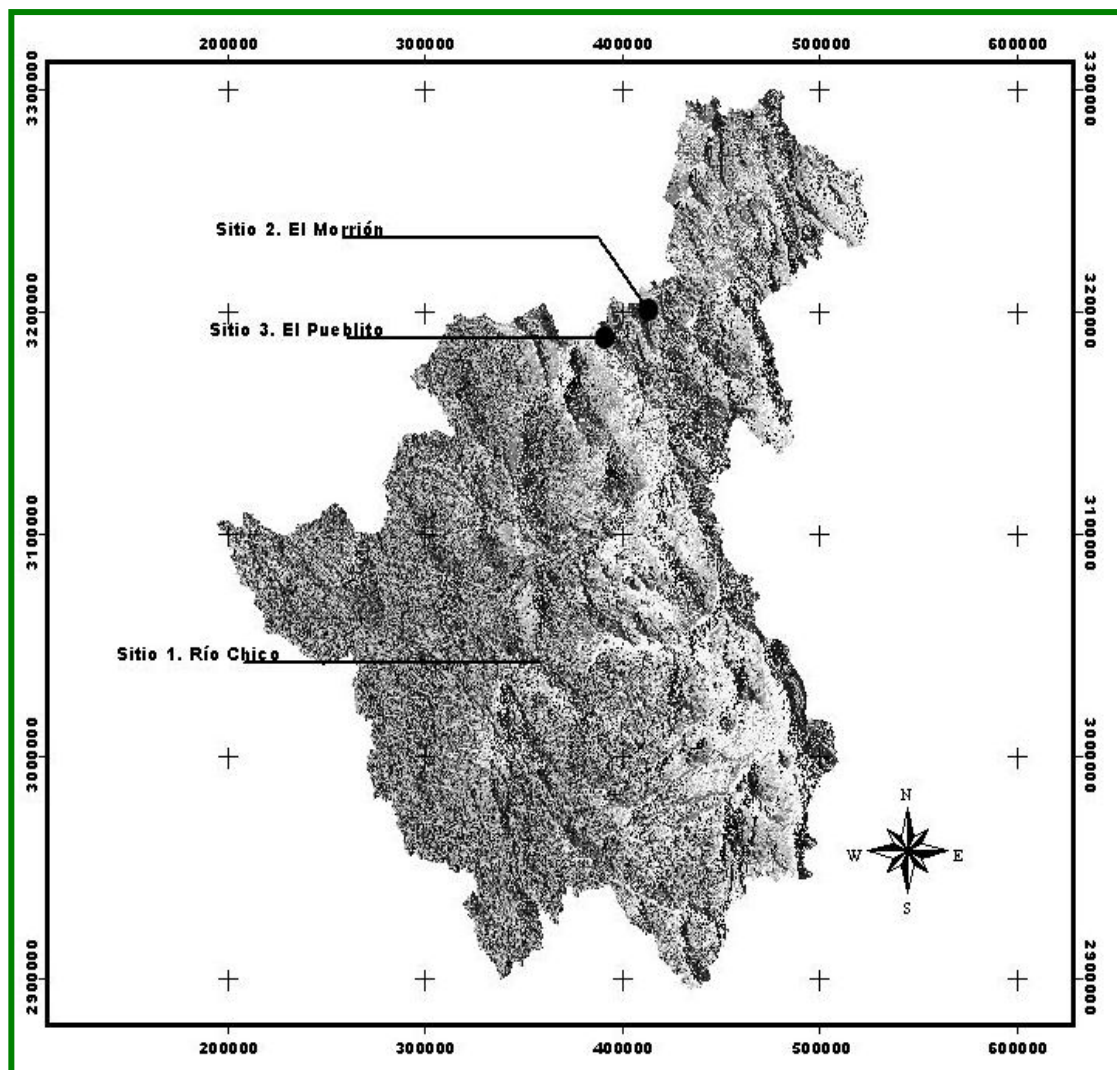


Figura 9. Ubicación de los sitios de estudio en la cuenca media y baja del Río Conchos, Chihuahua (puntos negros en el mapa).

segundo, sobre una zona de lomeríos de conglomerado y suelos del Cuaternario donde predomina el matorral xerófilo.

### **Metodología.**

**Textura.** Con muestras de 5 kg de suelo en cada sitio, se determinaron contenidos de arena, limo y arcilla por el método de Boyoucos, para clasificar textualmente la cubierta edafológica. A muestras de suelo tamizado de 2 mm proveniente de la mezcla anterior, se determinó la curva granulométrica de ocho fracciones (método de pipetas) para el cálculo de los parámetros de forma requeridos en la estimación de  $K_h$ .

**Densidad aparente ( $D_a$ ) y real ( $D_r$ ).** Se determinaron en laboratorio por el método de volumen de desplazamiento y del picnómetro respectivamente.

**Porosidad.** A partir de valores de densidad, se empleó la siguiente relación para el cálculo del porcentaje de poros:

$$P = 100 (1 - D_a/D_r) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde P, es el porcentaje de poros en el suelo de un horizonte considerado; ( $D_a/D_r$ ), la densidad aparente y real en mg de suelo en 1 m<sup>3</sup>, respectivamente y (1 -  $D_a/D_r$ ), es el volumen de poros en 1 m<sup>3</sup> de terreno.

**Pendiente ( $S$ ).** Se determinó con un Nivel NA28 Leica en cada una de las parcelas de simulación de lluvia.

**Estados de superficie.** Se describieron según los criterios de Cassenave y Valentín (1989) que contemplan cobertura vegetal basal y aérea, materia orgánica muerta, tipos de costras presentes en el suelo y fragmentos de roca, grava y arena. Los elementos que recubren la superficie del suelo, se

cuantificaron con el programa "TRIO" (Nuñez-López, 1995) que estima porcentajes de vegetación, mantillo, suelo encostrado, grava, arena, roca sobre imágenes de fotos de toma vertical de cada parcela.

### **Aptitudes Hidrodinámicas del Suelo Superficial.**

**Coefficientes de escurrimiento e infiltración.** Con un simulador de lluvia, tipo aspersor (Casenave y Valentin, 1989) versión cabeza electrónica (Deltalab ref: EID 340) en los tres sitios de estudio, se realizaron lluvias simuladas dentro de una superficie cuadrangular con una parcela experimental de 1 m<sup>2</sup> en su interior. Sobre una matriz de seis parcelas, se aplicaron dos lluvias con intensidades constantes de 60 mmh<sup>-1</sup> hasta obtener un mínimo de 10 lecturas bajo régimen permanente de escurrimiento o al menos 35 min de duración del evento.

El dispositivo permite medir la lámina de lluvia aplicada, el volumen de escurrimiento que se produce y por diferencia, se calcula la lámina de infiltración; con dichos componentes, se estima la aptitud del suelo para producir escurrimiento y para dejar pasar el agua dentro del suelo (Reyes-Gómez, 2005).

**Producción de sedimentos.** El agua de escurrimiento (*Es*), fue almacenada en una cubeta a la salida de la parcela de simulación; ese volumen total de agua de *Es*, fue filtrado en embudos de filtración en campo y por diferencia de pesos se estimó la cantidad de gramos de suelo erosionado por evento de lluvia por unidad de superficie.

## **Propiedades Hidráulicas del Suelo.**

**Conductividad hidráulica ( $K_h$ ) por simulación de lluvia.** El valor de la  $K_h$  con este método, se estimó a partir de los hidrográmas de escurrimiento generados durante la aplicación de cada lluvia. De forma cualitativa, esos hidrográmas permiten visualizar un régimen permanente de escurrimiento donde el agua que se infiltra no varía en función del tiempo, es decir, el suelo alcanza su equilibrio hidrodinámico (Asseline y Valentin, 1978). En esa fase de régimen permanente, se obtiene la media de la intensidad de infiltración y se acepta el supuesto de que el suelo está completamente saturado; por tanto, el valor de la tasa de infiltración bajo ese régimen, representa el valor de  $K_h$  en condiciones de lluvia (Delhoume, 1997).

**El Método de Beerkan: proceso de infiltración *in situ*.** Con un cilindro insertado en el suelo, se determinaron curvas de infiltración en función del tiempo para obtener el valor de  $K_h$ , realizándose 15 repeticiones en cada sitio. Este método aplicado en campo, considera el planteamiento matemático de relacionar la  $In$  determinada por Beerkan para estimar el valor de  $K_h$ , según el modelo de Brooks y Corey (1964). Se escogió este método, dada su simplicidad de aplicación en campo ya que el proceso de infiltración se presenta en condiciones naturales; se utiliza para obtener de forma inversa los parámetros de adimensionalización invariante de la infiltración como lo explica De Condapa, 2000 y Reyes-Gómez *et al.*, 2007.

**Principios físicos de Beerkan.** A partir de las curvas explicadas en el párrafo anterior, se realizó un ajuste inverso para obtener los parámetros de

adimensionalización ( $\alpha_t$  y  $\alpha_i$ ) de la infiltración mediante la ley analítica del proceso de infiltración (De Condapa, 2000 y Reyes-Gómez *et al.*, 2007):

$$\alpha_i I = \alpha_t t + \ln(1 + \alpha_i I) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $\alpha_t$  y  $\alpha_i$  son parámetros de forma de las curvas de infiltración, ajustadas a los valores adquiridos en campo ( $s^{-1}$ ,  $m^{-1}$ , respectivamente);  $I$  y  $t$ , lámina de ( $ln$ ) y tiempo transcurrido del experimento.

Este ajuste se realizó con la opción Solver en Excel, obteniéndose los valores de forma de la curva de infiltración acumulada adimensional e invariante, utilizándose el método del mínimo error cuadrático. Una segunda fase del método Beerkan, consistió en determinar el valor de  $\eta$  que representa el parámetro de forma de la curva de  $K_h$  del modelo de Brooks y Corey (1964) adquirido del producto de  $m_n$  de los parámetros de la curva granulométrica de partículas de suelo por analogía con la curva de retención de humedad de Van Genuchten (1980). Con los valores de  $\eta$ ,  $\alpha_t$  y  $\alpha_i$ , se determina el valor de la  $K_h$  con una seguridad de cubrir los mínimos requerimientos físicos y matemáticos para una gran gama de tipos de suelos.

La relación resultante de la combinación del modelo de infiltración y el de Brooks y Corey (1964) esta dada por:

$$K_s = \frac{\alpha_t}{\alpha_i} \left[ 1 - \left( \frac{\theta_o}{\theta_s} \right)^\eta \right]^{-1} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde  $K_s$  es la conductividad hidráulica ( $m s^{-1}$ ),  $\theta_o$  y  $\theta_s$ , son respectivamente las humedades inicial y a saturación ( $m m^{-3}$ ), estimada la primera en campo y la segunda con la determinación de porosidad total (Haverkamp *et al.*, 1990).

### **Análisis de la Información.**

Se calcularon medidas de tendencia central para determinar coeficientes promedio de infiltración y escurrimiento; desviación estándar y coeficiente de variación para analizar la variabilidad de los valores medios. Para las propiedades hidráulicas, se estimaron valores  $\alpha_t$  y  $\alpha_i$  en el proceso de infiltración *in situ*, con ajustes de regresión logarítmica (Reyes-Gómez, 2002). Por último, la reagrupación de sitios con comportamiento hidrológico similar y para probar la hipótesis del efecto de la interfase lluvia-estados de superficie-vegetación-escurrimiento-infiltración, se realizó con un Análisis de Componentes Principales (ACP) en el programa SAS<sup>®</sup> (User's Guide, 1985) con el siguiente grupo de variables: coeficientes de escurrimiento e infiltración en suelo seco y húmedo; la conductividad hidráulica a saturación, estimada por simulación de lluvia y por Beerkan; los porcentajes de estados de superficie como vegetación, mantillo, costras, gravas, pedregosidad; los parámetros de superficie, pendiente y contenidos de arcilla, limo y arena y la humedad de capacidad de campo.

## RESULTADOS

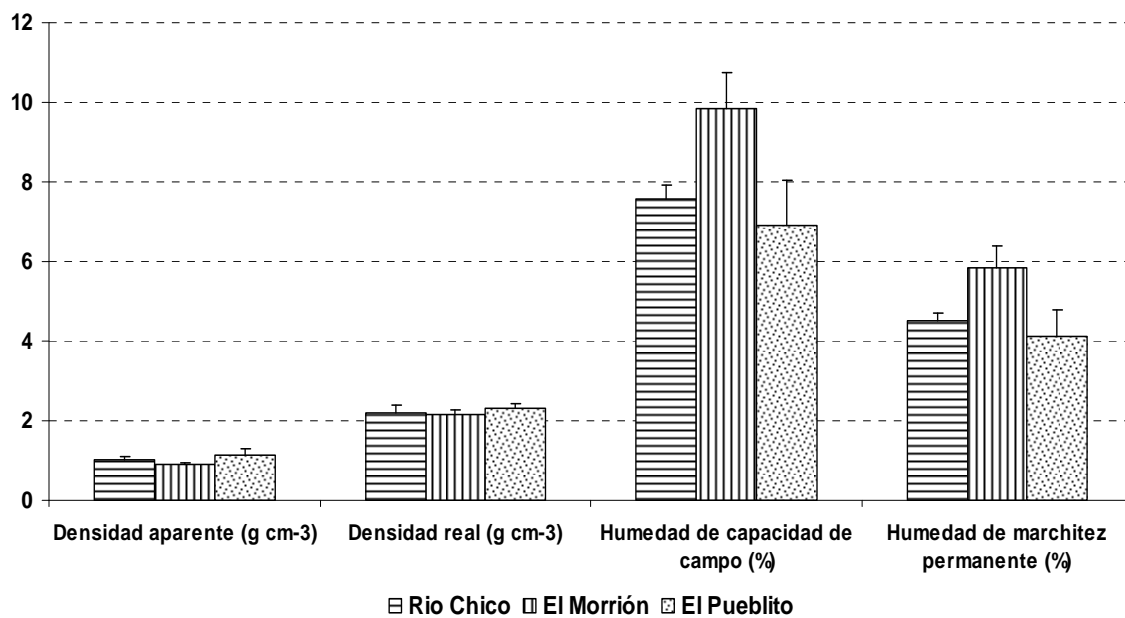
### Características Físicas del Suelo.

Se observó que la densidad aparente ( $D_a$ ) y real ( $D_s$ ) fueron similares en los tres sitios (Gráfica 7) en cambio, la humedad de capacidad de campo ( $H_{cc}$ ) presentó un gradiente de mayor aceptación de agua en El Morrión a menor en El Pueblito ( $H_{cc} = 10$  y  $7$ , respectivamente); de igual manera, la humedad de punto de marchitamiento permanente ( $H_{pmp}$ ) fue mayor en El Morrión ( $6\%$ ), mientras que en los sitios 1 y 3 osciló entre  $4.1$  y  $4.5\%$ , respectivamente.

Los bajos valores reflejados en  $H_{cc}$  y  $H_{pmp}$ , permiten apreciar los reducidos contenidos de humedad disponible en el suelo para que sea utilizada sin adaptaciones fisiológicas características de las plantas xerófilas, especies vasculares que tienen una posibilidad muy corta en tiempo, en la que la oferta evapotranspirativa está cubierta por presencia de humedad disponible, entre los meses de julio y octubre (Cornet, 1988; Montaña *et al.*, 1995).

### Estados de Superficie del Suelo.

En la Gráfica 8. se muestran los resultados obtenidos sobre el estado de superficie de los suelos en los sitios estudiados. En Río Chico, predomina la vegetación de tipo pastizal, cubriendo  $74\%$ ; EL Morrión y El Pueblito, tuvieron mayor porcentaje de grava y suelo encostrado ( $78\%$  y  $96\%$ , respectivamente), donde el mantillo y la vegetación son menos representativos. Estas diferencias de mayor vegetación en la cuenca media y mayor cobertura de elementos gruesos en la parte baja, coinciden con los resultados obtenidos por otros autores donde la presencia de suelo encostrado y sin vegetación predominan



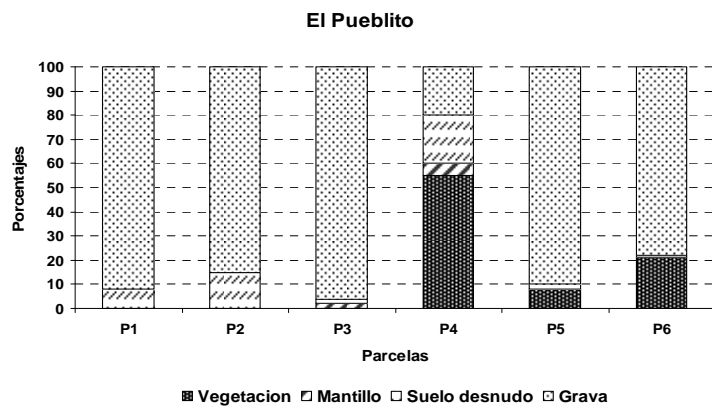
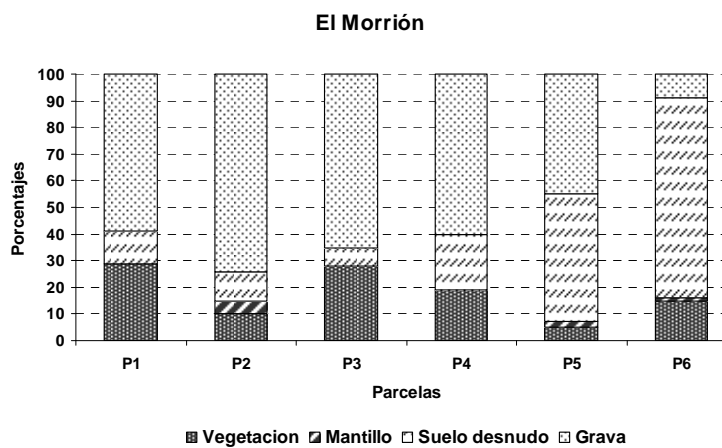
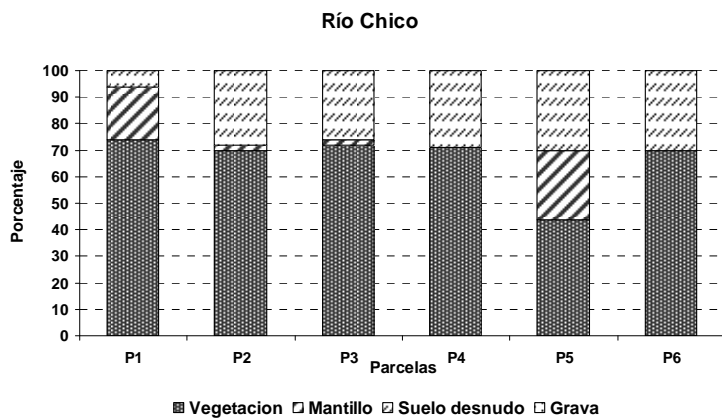
Gráfica 7. Valores promedio y desviación estándar de las características físicas del suelo.

Leyenda: Da = densidad aparente.

Ds = Densidad real.

Hcc = Humedad de capacidad de campo.

Hpmp = Humedad de punto de marchitamiento permanente.

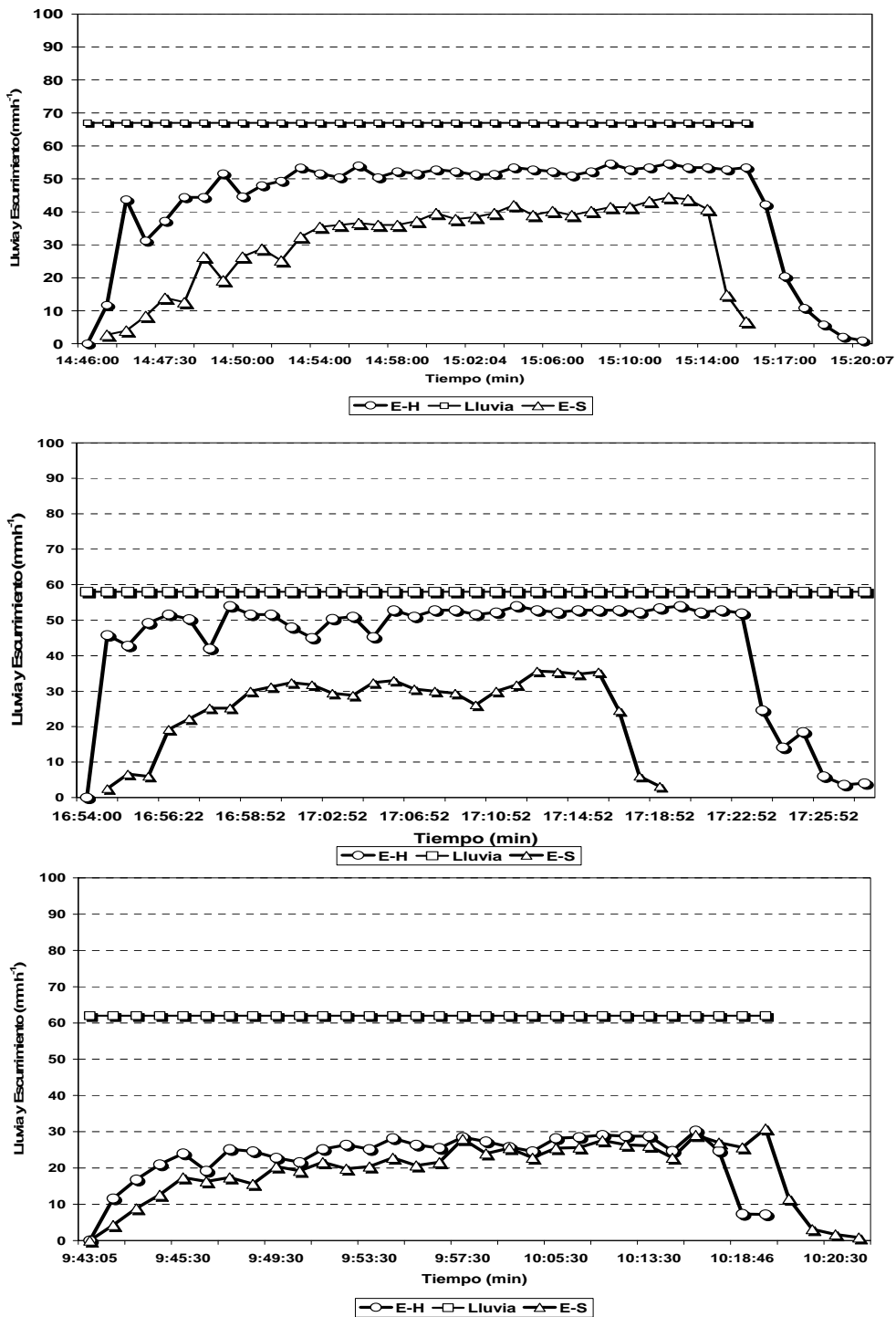


Gráfica 8. Porcentaje de los estados de superficie en la cuenca media y baja del Río Conchos.

en las partes bajas y zonas de playa del ecosistema del desierto chihuahuense (Delhoume, 1997; Desconnets, 1992; Reyes-Gómez, 1996). Los resultados de la cubierta edafológica y sus componentes como mantillo, costras y vegetación, más adelante serán argumentos de la variación de los coeficientes de escurrimiento e infiltración en los dos paisajes estudiados.

### **Simulación de Lluvia.**

Los hidrográmas clásicos de  $E_s$  obtenidos por simulación de lluvia, (Gráfica 9) al igual que trabajos de varios autores, muestran la presencia de una fase de régimen permanente (parte plana de la curva) que indica el equilibrio hidrodinámico del suelo y la etapa donde se adquiere el valor de  $K_h$  por este método (Tarin-Torres, 1992; Alcalá de Jesús, 1998; Desconnets, 1992). En términos de producción de sedimentos, en El Morrión, se produjo mayor masa de suelo arrastrado por  $E_s$  (29.07 y 18.0  $\text{gm}^{-2}$  / lluvia, respectivamente, para suelo seco y húmedo); en cambio, en Río Chico fue 5.25  $\text{gm}^{-2}$  / lluvia para estado inicial seco y 7.72  $\text{gm}^{-2}$  / lluvia para inicial húmedo. Éstos resultados (Cuadro 2) evidencian la importancia de la vegetación en la protección del suelo contra la erosión hídrica como lo demostraron Viramontes *et al.* (2002), Martínez-Ochoa (2007) y Miranda (2006) cuyos resultados permiten reforzar el cumplimiento de la hipótesis de que el estado superficial edáfico, determina la interfase lluvia-suelo-infiltración-escurrimiento, asociado a la erosión. A este nivel de resultados, cabe mencionar que en suelos cubiertos por vegetación, se presenta una menor erosión que en suelos desprovistos de esta, tal como lo han demostrado otros estudios (Alcalá de Jesús *et al.*, 1998).



Gráfica 9. Ejemplos de hidrogramas –tipo- del escurrimiento.

Leyenda:

Río Chico (P5-S1 = parcela 5, del sitio 1).

El Morrión (P2-S3 = parcela 2 del sitio 3).

El Pueblito (P3-S2 = parcela 3 del sitio 2).

CUADRO 2. PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS  
EN  $\text{gm}^{-2}$  / LLUVIA

Río Chico	X	DS	CV
Seco	5.25	3.47	0.66
Húmedo	7.72	8.78	1.14
<b>El Morrión</b>			
Seco	29.07	12.32	0.42
Húmedo	18.00	13.62	0.76
<b>El Pueblito</b>			
Seco	13.76	4.38	0.32
Húmedo	11.97	3.47	0.29

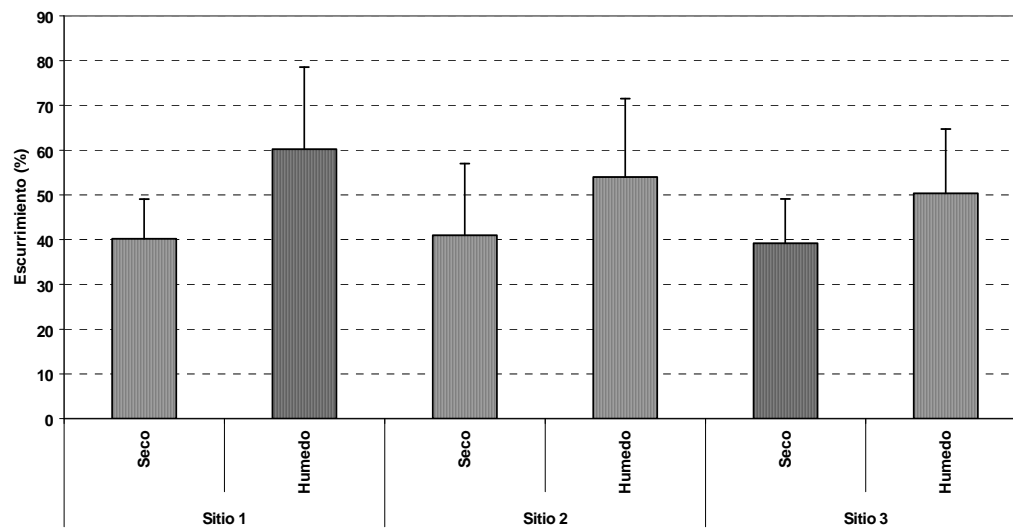
### **Aptitudes Hidrodinámicas del Suelo.**

La infiltración en suelo inicialmente seco, fue similar en los tres sitios (aproximadamente 60 %), mientras que en estado húmedo, disminuyó 39.7 % y 50 % en Río Chico y El Pueblito, respectivamente. La fracción de lluvia infiltrada fue menor en parcelas húmedas con respecto a aquellas con suelo seco, algo lógico si se considera que el suelo está más saturado (Hilliel, 1980) lo que indica que el espacio de porosidad a remplazar con agua es menor, esto propicia que cuando una lluvia nueva se presenta en esas condiciones de saturación, la infiltración se minimiza y se genera un mayor escurrimiento, como lo indica Alcalá de Jesús *et al.* (1998) y se aprecia en Gráfica 10.

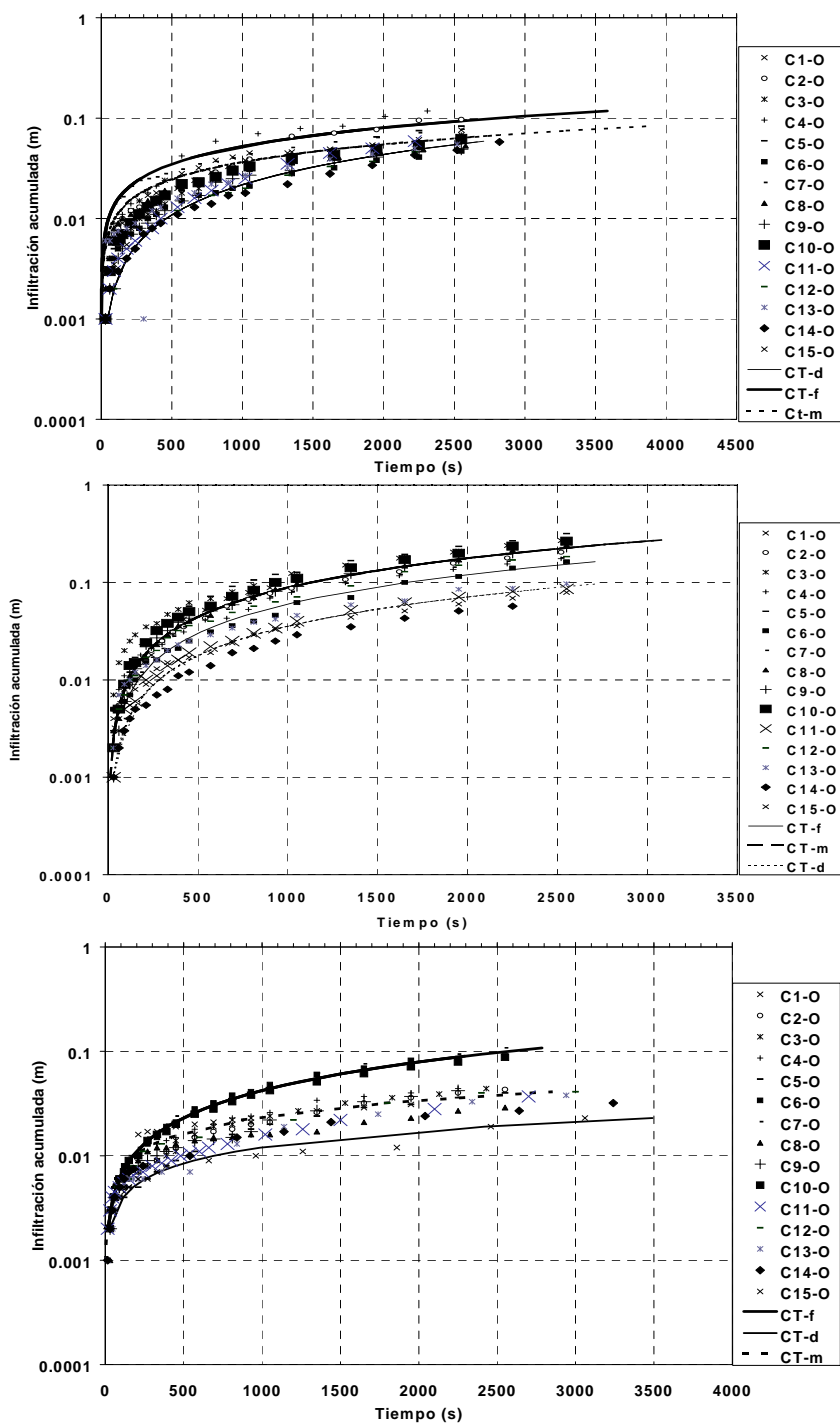
Con estos resultados, existe evidencia que las zonas bajas de la cuenca del Río Conchos son altas productoras de escurrimiento a diferencia de la parte media y alta donde la *In* predomina, sobre todo en aquellas zonas donde la vegetación o mantillo están presentes en porcentajes mayores a 60 %. Además, se visualiza que los suelos superficiales de la parte media, tienen un papel hidrológico ambiental para dejar infiltrar agua al subsuelo (recarga); en tanto que las zonas bajas, presentan mayor escurrimiento que generalmente se almacena en las represas que conforman las 11 celdas hidrológicas del hidrosistema del Río Conchos (Kelly, 2001).

### **Evolución de la Infiltración con el Método de BeerKan.**

En la (Gráfica 11) se ilustran las curvas de evolución de la infiltración obtenida *in situ* en los tres sitios. Las líneas continuas, representan el ajuste de *In* que sirvieron para evaluar los parámetros que ligan la ecuación clásica de *In*



Gráfica 10. Aptitudes de esguerrimiento en suelo seco y húmedo en tres sitios de estudio en la cuenca del Río Conchos.



Gráfica 11. Curvas de infiltración obtenidas por Beerkan.

Leyenda:

C1 – C15= Número de cilindro.

CT-d = Curva de ajuste para valores débiles.

CT-F= Curva de ajuste para valores fuertes.

CT-m= Curva de ajuste para valores medios.

con el método de Brooks y Corey (1964) para estimar  $K_s$ . La  $I_n$  final acumulada fue mayor en Río Chico ( 0.1 m a los 3000 seg); la lámina acumulada infiltrada en El Morrión y El Pueblito, fue: 0.01 y 0.1 m, respectivamente. Observando las curvas de  $I_n$  en los tres sitios, se distinguen dos fases importantes: la primera, es una  $I_n$  básica fuerte que significó una absorción de agua que puede representar la fase de sortividad (agua que se infiltra sin efecto gravitacional); la segunda, que ilustra una fase de  $I_n$  que puede corresponder a la  $K_s$  a saturación.

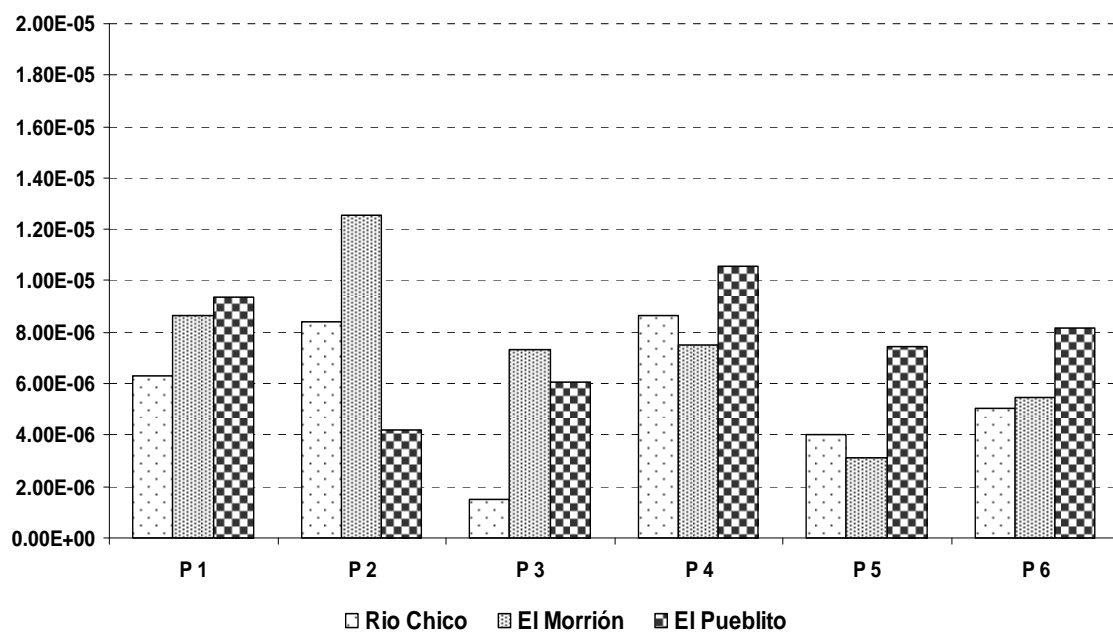
Considerando las tres ó cuatro líneas sólidas de las curvas de  $I_n$  que representan los promedios de 5 ó 6 cilindros que reflejaron una evolución similar de la  $I_n$ , se puede apreciar que existen extremos (máximos y mínimos) y una curva media que representa los valores promedio en cada sitio. Esas curvas sólidas, muestran que en sitios de pastizal como Río Chico, los valores acumulados máximos de la  $I_n$  en fase final, superan a 0.15 m, le sigue El Morrión con 0.1 m, observándose un valor menor a 0.1 en el caso de El Pueblito. A este comportamiento, se observa con mayor claridad en las curvas del extremo mínimo, donde los valores en orden descendente son 0.1 m para Río Chico, 0.016 m para El Morrión y El Pueblito con 0.012 m. Estos resultados, permitieron constatar la importancia de la vegetación para propiciar una mayor  $I_n$  de agua utilizada abundantemente por las plantas que sustentan a los suelos en la cuenca media; contrariamente, los resultados permiten ver la aptitud edáfica en la parte baja para generar escurrimientos que son interceptados pendiente abajo por las depresiones del relieve en las planicies que finalmente, son aprovechados por los mosaicos de vegetación tan particular en la cuenca

baja del Conchos (zonas de manchas y arcos de vegetación atigrada, Reyes-Gómez, 2005). Este comportamiento hidrológico del suelo superficial de la cuenca, coincide con la mayoría de los estudios realizados en zonas áridas y semiáridas del mundo y de México (Awadhwal y Thierstein, 1985; Belnap *et al.*, 2001), donde la infiltración se puede reducir cuando el suelo está encostrado o es cambiado su uso y abandonado al efecto de la cinética de las gotas de lluvia (erosión, compactación y reorganización estructural del primer horizonte). Este proceso hídrico-edafológico, produce la génesis de superficies encostradas con propiedades hidrodinámicas especiales que impiden, hasta cierto grado, el paso del agua hacia horizontes más profundos, que generan una mayor producción de escurrimiento (Casenave y Valentin, 1989) como se apreciará en los párrafos subsecuentes.

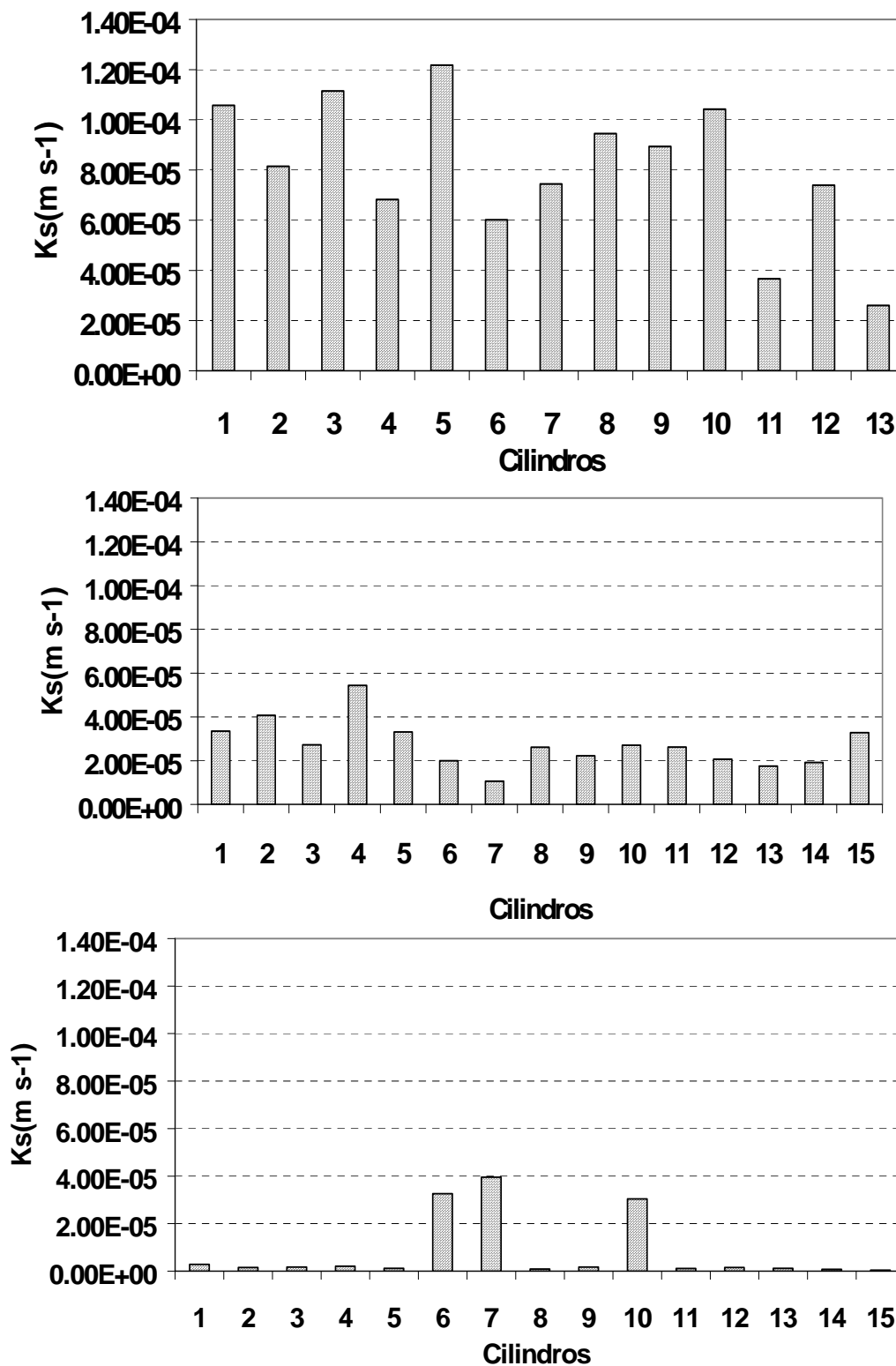
### **Propiedades Hidráulicas.**

**Conductividad hidráulica ( $K_h$ ) con lluvia simulada.** Los valores promedios de  $K_h$  por este método se presentan en la (Gráfica 12) donde se aprecian pocas diferencias entre los tres sitios. Los valores de  $K_h$  en condiciones de lluvia, reflejan bajas aptitudes para dejar pasar agua dentro del suelo, probablemente, porque con este método, el agua que se logra almacenar sobre la superficie no se acumula, sino que escurre en sentido de la pendiente, produciéndose una menor tasa de infiltración. Estos resultados, difieren con lo observado por el método de  $I_n$  controlada, donde se logró poner en evidencia aptitudes diferentes de  $I_n$ .

**Conductividad hidráulica ( $K_h$ ) por BeerKan.** La mayor facilidad que presentó el suelo para dejar pasar el agua en forma de  $I_n$ , (Gráfica 13) se observó en Río



Gráfica 12. Conductividad hidráulica con lluvia simulada para los tres sitios en estudio en la cuenca del Río Conchos.



Gráfica 13. Conductividad hidráulica con el Método de BeerKan, en los sitios de estudio. a) Río Chico, b) El Morrión, c) El Pueblito, en la cuenca del Río Conchos.

Chico con valores de  $K_h$  mínimos (entre 2.5E-05 y 4.5E-05  $\text{m s}^{-1}$ ) que corresponden en algunos casos a máximos encontrados en El Morrión y El Pueblito, apreciándose que en el primero, en los 11 puntos de medición el valor de  $K_h$  se encuentra entre 6.5E-05  $\text{m s}^{-1}$  y 8.2E-04  $\text{m s}^{-1}$  (es decir 4 o 5 veces superior que en los otros dos sitios). Los lugares con mayor resistencia a la infiltración fueron aquellos con matorral xerófilo de lomeríos y planicies de la parte baja de la cuenca del Río Conchos; los valores de  $K_h$  en 12 de los puntos de muestreo se mantuvieron alrededor de 1.0E-05  $\text{m s}^{-1}$ ; ésta resistencia disminuye en los sitios de pie de monte en las sierras aledañas a planicies tal como lo muestran los valores de  $K_h$  en el sitio del Morrión (Gráfica 13) cuya velocidad de infiltración en suelos saturados, presentó (para 14 puntos de muestreo) rangos entre 2.0E-05 y 5.0E-05  $\text{m s}^{-1}$ .

Con estos resultados, se constata el papel de la vegetación en Río Chico que produjo una mayor  $K_h$ ; contrariamente en El Morrión y El Pueblito, donde existe una cubierta de costras que impiden la  $I_n$  debido a la propiedad de hidrofobia que le confieren éstas al suelo subyacente (Reyes-Gómez, 2005). Si se consideran los dos métodos empleados, la lluvia simulada permite que la lámina de agua que se acumula sobre la superficie del suelo, escurra libremente en sentido de la pendiente, dicho volumen, puede ser representativo del “excedente” que se infiltra por el método de Beerkan, donde la lámina acumulada en el área del suelo puede infiltrarse totalmente, como se mostró en los resultados de este estudio, los que coinciden con los obtenidos por De Condapa (2000).

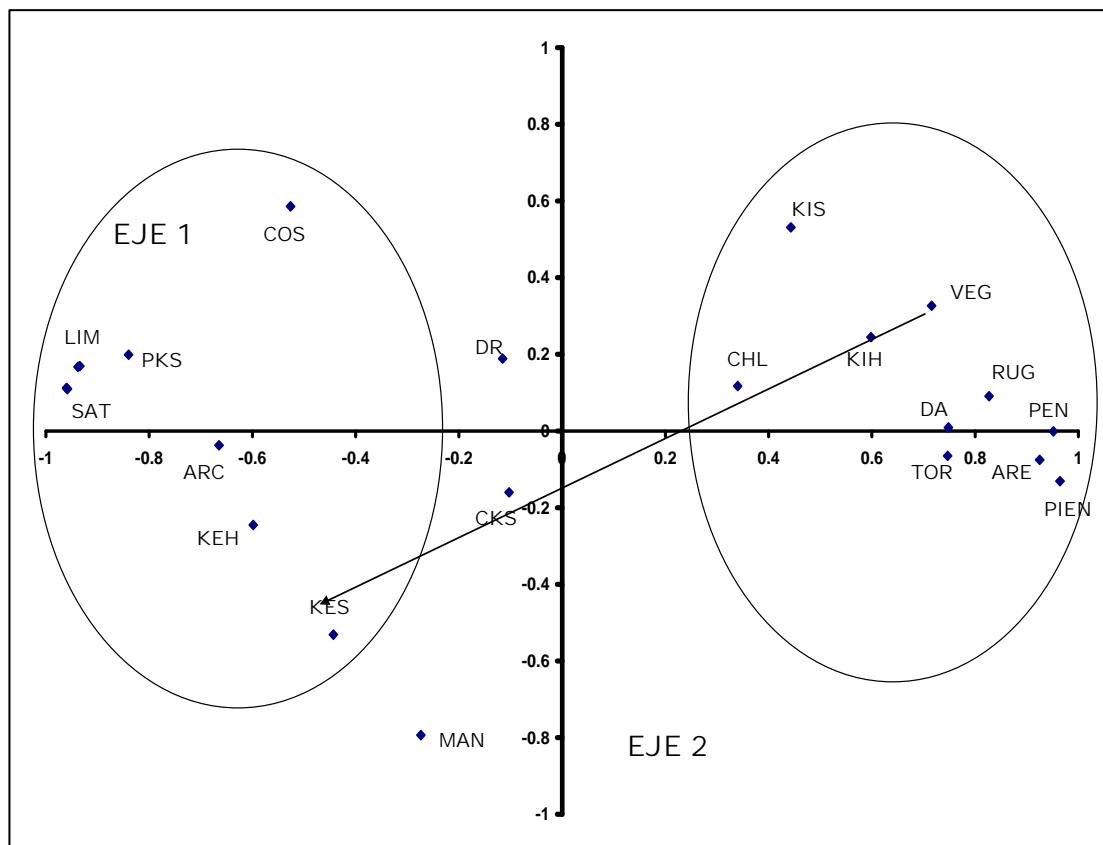
Se concluye que la simulación de lluvia, es apropiada para saber cuanta

agua se infiltra durante un evento de lluvia como ocurre en la naturaleza, pero para estimar la tasa real de  $I_n$  en condiciones de inundación, lo más apropiado es utilizar Beerkan que permite visualizar los valores máximos de infiltración. Estos resultados sugieren, una subestimación de la  $I_n$  por simulación de lluvia lo cual puede confundirse porque es justamente lo que logra estar ocurriendo durante un evento pluvial; contrariamente, por el método Beerkan, puede pensarse que la infiltración se sobre estima. Sin embargo, esos valores permitieron apreciar las láminas máximas que el suelo pudo aceptar en condiciones de saturación en horizontes superficiales; es decir, los dos métodos se complementan, por un lado, se observan las aptitudes de  $I_n$  en condiciones naturales, y por otro, las láminas máximas que se pueden infiltrar en condiciones extraordinarias como es el caso de lluvias torrenciales e inundaciones de terreno, o en el caso de riego por gravedad en zonas de cultivo.

**Separación de grupos hidrológicos.** La visualización de variabilidad de suelos en términos de comportamiento hidrodinámico, se analizó con la aplicación de un Análisis de Componentes Principales (*ACP*), que permitió reducir la dimensionalidad de los datos obtenidos en la cuenca media y baja del Río Conchos. La varianza acumulada de los tres componentes principales (*CP*), involucrando los sitios de la parte media, alcanzó rangos entre 72 y 89 % (Cuadro 3) pudiendo con ello observar una agrupación de observaciones que permitieron explicar el efecto planteado en la hipótesis de trabajo. Para el caso del *ACP* de la cuenca media, los *CP1* (eje X) y *CP3* (eje Y) de la Gráfica 14 muestran mayor correlación en función de los parámetros de estado de

CUADRO 3. VARIANZA ACUMULADA EN LOS ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)

Cuenca	Baja	Media	Baja y Media
CP	Varianza acumulada (%)		
1	37.53	53.33	28.23
2	59.00	80.36	53.27
3	71.82	89.09	72.00



Gráfica 14. Plano de componentes 1 y 3 en la cuenca media del Río Conchos.

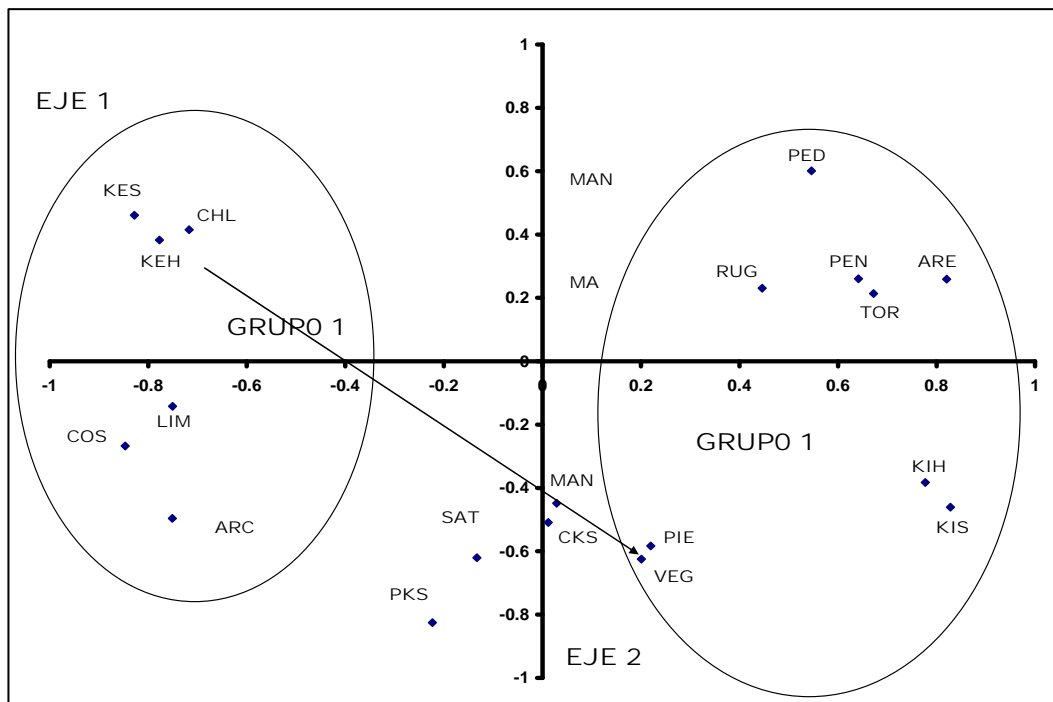
Leyenda:

LIM, limo; SAT, % de saturación; PKS, promedio de  $K_s$ ; COS, costra; ARC, arcilla; KES y KEH, coeficiente de  $E_s$  en suelo seco y húmedo respectivamente; MAN, mantillo; DR y DA, densidad real y aparente, respectivamente; CHL,  $K_s$ , VEG, vegetación; RUG, rugosidad, PEN, pendiente; ARE, arenoso y TOR, tortuosidad.

superficie, seguidas de las variables explicativas de la aptitudes de  $In$  y  $Es$  en los sitios experimentales. Con los  $ACP$  se reconocieron suelos que permiten la infiltración (Grupo I), que se asocian a la presencia de vegetación, arena, tortuosidad, rugosidad y suelos donde la  $K_h$  se correlaciona a la presencia de costra, significando que a mayor suelo encostrado, se reduce la  $K_h$ ; el sentido de la flecha en la figura, indica esos efectos de tipo de superficie sobre la tasa de infiltración máxima o  $K_h$ .

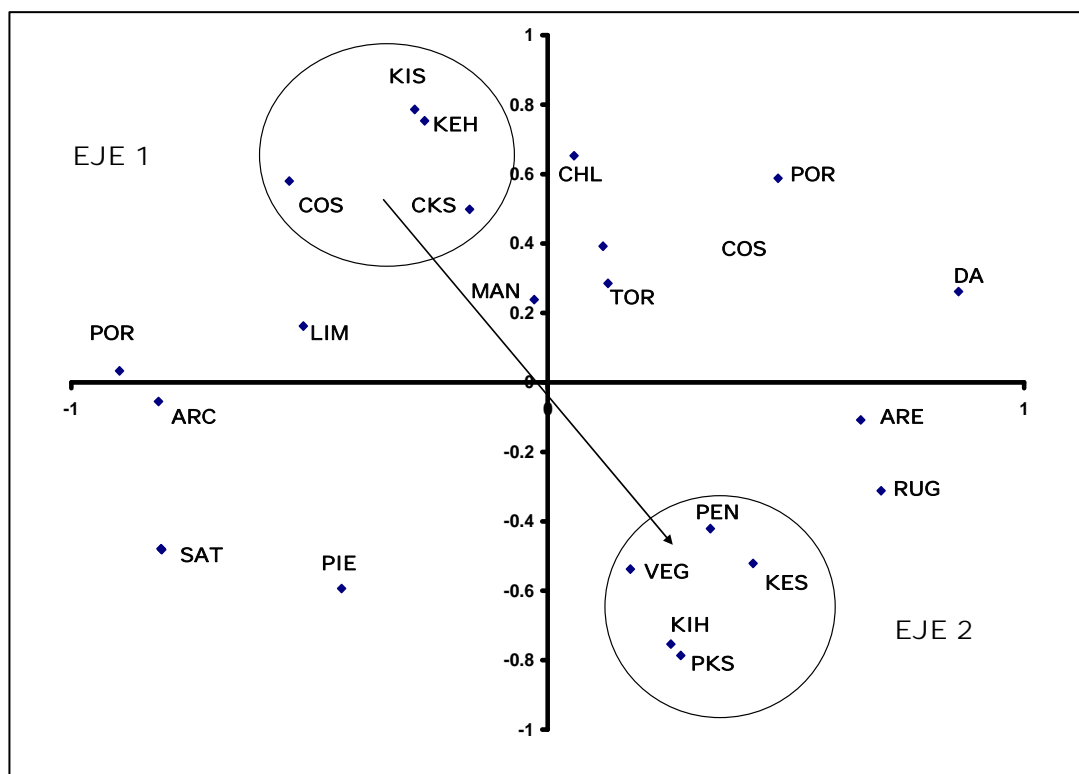
Un segundo  $ACP$ , se hizo en la parte baja (El Morrión y El Pueblito), donde una varianza acumulada del 71.8 % con los dos primeros componentes principales (Gráfica 15), se vuelve a presentar el patrón de agrupación por sus características físicas, seguidas de las variables explicativas de las aptitudes de  $In$  y  $Es$ , lo que indica que a mayor cantidad de suelo arenoso y flora, la  $In$  y la  $K_h$  son mayores, a diferencia de suelos encostrados y con escasa vegetación donde esa posibilidad se reduce.

Finalmente la relación que involucra los resultados de la parte media y baja de la cuenca del Río Conchos, con una varianza acumulada de 72 % en los primeros tres  $CP$ , se vuelve a constatar el efecto de la superficie del suelo. Se obtuvo una correlación positiva entre la vegetación y el  $Es$ , sea, entre más cobertura, mayor infiltración (Río Chico); y por el contrario, en suelos encostrados, el valor de  $K_h$  será menor y la  $In$  se reduce (Gráfica 16).



Gráfica 15. Plano de componentes 1 y 2 en la cuenca baja del Río Conchos.

Leyenda: LIM, limo; SAT, % de saturación; PKS, promedio de  $K_s$ ; COS, costra; ARC, arcilla; KES y KEH, coeficiente de escurrimiento en suelo seco y húmedo respectivamente; MAN, mantillo; CHL,  $K_s$ , VEG, vegetación; RUG, rugosidad, PEN, pendiente; ARE, arenoso y TOR, tortuosidad.



Gráfica 16. Plano de componentes 1 y 2 en la cuenca media y baja de la cuenca del Río Conchos.

Leyenda: LIM, limo; SAT, % de saturación; PKS, promedio de  $K_s$ ; COS, costra; ARC, arcilla; KES y KEH, coeficiente de  $E_s$  en suelo seco y húmedo respectivamente; MAN, mantillo; DR y DA, densidad real y aparente, respectivamente; CHL,  $K_s$ , VEG, vegetación; RUG, rugosidad, PEN, pendiente; ARE, arenoso y TOR, rugosidad.

## CONCLUSIONES

- 1) Bajo las condiciones particulares del estudio, la simulación de lluvia y la Infiltración controlada, son dos herramientas que ayudan a caracterizar el comportamiento hidrodinámico de los primeros 20 cm del suelo.
- 2) Los resultados sobre infiltración ( $In$ ) y escurrimiento ( $Es$ ), ponen en evidencia el papel que juega la superficie del suelo donde el mantillo y la vegetación favorecen la  $In$ ; contrariamente, cuando está cubierto por costras o compactado (paso de maquinaria agrícola y sobre pastoreo) se presenta mayor  $Es$  superficial.
- 3) Los suelos con mayor capacidad de infiltración, fueron aquellos con vegetación (Río Chico) donde abunda el pastizal abierto y zonas con depósito de hojarasca de pastizal y otras plantas que favorecen el proceso de infiltración.
- 4) Cuando la pendiente es pronunciada, se da un aumento del  $Es$ , debido a que el agua que se acumula en la superficie puede desplazarse aguas abajo, evitando su retención. El  $Es$  más significativo, fue en zonas bajas como El Morrión y El Pueblito, donde el suelo está encostrado y desprovisto de vegetación abundante lo que imposibilita la retención de agua y la infiltración.
- 6) Los resultados estadísticos, permitieron probar que la interfase lluvia-estados de superficie-infiltración–escurrimiento, pone en evidencia la función hidrológica del suelo superficial en la cuenca del Río Conchos y por el otro que la  $K_h$  del suelo, refleja cuantitativamente los servicios hidrológico-ambientales que se ofrecen (al permitir o no recarga de agua a los acuíferos) en la zona de pastizales y de matorral xerófilo de la cuenca media y baja del Río Conchos.

## LITERATURA CITADA

- Abortes-Aguilar, L. 2002. Hacia una Historia del Río Conchos. CIESAS, Cd. Juárez, Chihuahua: 5-6 p.
- Alcalá-de-Jesús, M., Oropeza-Mota, J.L., Tovar-Salinas, J.L., 1998. Producción de sedimentos en diferentes usos del suelo, en la cuenca del río Los Sauces, Michoacán. *Agrociencias*, 32(3): 225-231p.
- Asseline, J. y Valentin C. 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre á aspersion. *Cah. ORSTOM*, ser. Hydrol. Vol. 15. Núm (4): 321-350 p.
- Awadhwai, N.K. y Thierstein, G. E., 1985. Soil crust and its impact on crop establishment: a review. *Soil Tillage Research*, (5): 289-302 p.
- Belnap, J. B. Büdel y O.L. Lange. 2001. Biological Soil Crust: Characteristics and Distribution. P. 3-30, in: *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Belnap J., O.L. Lange (edits). SPRINGLER, ISBN 3-540-41075-9, New York, U.S.A. Vol (3): 503 p.
- Brooks, R.H. y Corey, T., 1964 Hydraulic properties of pores media. *Hydrology Papers*. Fort Collind: Colorado State University. 3-4 p.
- Carreón, H.E., C. Pinedo y A. Lafón. 2001. Aplicación de la tecnología geoespacial en el estudio de cuencas: Caso río Conchos. XI Congreso Nacional de Irrigación, Simposio 5. Manejo Integral de Cuencas. Guanajuato, Gto, México. 150-155 p.
- Casenave, A. y C Valentin. 1989. Les états de surface de la zone Sahélienne : Influence sur l'infiltration". IRD, Paris, France, 1989, 229 p.
- CNA. 2001a. Comisión de Cuenca del Río Conchos. Diagnóstico Versión 1.0 Gerencia Estatal Chihuahua, Chihuahua, México: 36-37 p.
- CNA. 2001b. Programa Nacional Hidráulico 2001-2006 Méx.
- Cornet, A., 1988. Principales Caractéristiques Climatiques. p.p. 45-76, in Montaña, C. (ed.) Estudio Integrado de los Recursos Vegetación, Suelo y Agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimí. INECOL, Xalapa, Veracruz, México.
- De Condapa. 2000. Illustration de la méthode Beer-Kan en vue de la caractérisation hydrodynamique d'un sol. DEA, Grenoble INPG, Francia. 43 p.

- Delhoume, J.P., 1997. Fonctionnement hydro-pédologique d'une topo-sequence de sols en milieu aride. Réserve de la biosphère de Mapimi, Nord-México. Theses et documents microfichés. IRD-Paris, 295-298 p.
- Desconnets, J.C., 1992. Analyse des comportements hydriques de trois parcelles expérimentales implantées en zone basse d'un bassin endoréique. Zone aride du nord Mexique. Thèse DEA, Université Poitiers, France, 95 p.
- Findeling, A. 2001. Etude de la modelisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azote de une culture de maïs pluvial au Mexique. Thèse Docteur Montpellier, Ecole Nationale du Génie Rural de Eaux et Forêts: 355 p.
- Haverkamp, R., J. Parlange., J. Starr., G. Scmitz. y C. Fuentes. 1990. Infiltration under ponded conditions: 3. a predictive equation based on physical parameters. *Soil Science*. Vol. 149. Núm (5): 292-300 p.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of Soil Physics*. Chap. 8: Flow of water in saturated Soil. AP, San Diego, New York, USA. 5-46 p.
- INEGI. 1988. Sistema estatal de información: Situación del sector primario en el estado de Chihuahua. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática y Gobierno del Estado de Chihuahua, 3-22 p.
- Kelly M.E. 2001. El río Conchos: un informe preliminar. Texas Center for Policy Studies. Austin Texas. 3-7 p.
- Martínez-Ochoa, G., 2007. Efecto de la intensidad de lluvia sobre la producción de escurrimiento y erosión en la Microcuenca El General, Mapimí, Durango. Tesis de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. 95 p.
- Miranda, N.E. 2006. Caracterización hidrodinámica del suelo superficial en la cuenca media alta del río Conchos. Tesis de licenciatura, Facultad de Zootecnia, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Montaña, C., Cavgnaro, B. y Briones, O., 1995. Soil water use by co-existing shrubs and grasses in the southern Chihuahuan Desert, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 31:1-13 p.
- Núñez-López, D. 1995. Uso de imágenes digitales de video como herramienta de teledetecciones en apoyo a la evaluación de los recursos naturales. Tesis de licenciatura. Escuela de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), 95 p.

- Reyes-Gómez, V.M. 2002. Quantification et modelisation des flux hydriques, thermiques, et azotes dans les systemes de culture en semis direct avec couverture vegetale dans la region des cerrados bresiliens. Tesis de doctorado. Docteur del 'Universite Montpellier 2. Paris Francia : 4 – 254 p.
- Reyes-Gómez, V.M. 2005. Hidrodinámica superficial de los suelos de playa, pp 79-91 en: Las playas del desierto chihuahuense (parte mexicana), influencia de las sales en medio ambiente árido y semiárido. Grünberger O., Reyes-Gómez V.M., J.L. Janeau (editores), IRD-INECOL : 350 p.
- Reyes-Gómez, V.M., D. Viramontes, N. Miranda-Ojeda, P.B. Sánchez-Rodríguez, O. Viramontes. 2007. Papel hidrológico-ambiental de las propiedades hidráulicas del suelo superficial de la cuenca del río Conchos. Ingeniería hidráulica en México. XXII(4): 33-46 p.
- Reyes-Gómez, V.M., Grünberger y J.L. Janeau. 1996. Hidrodinámica en el suelo de un pastizal en una zona árida del norte de México. TERRA. Vol. 14. Núm. (2), 129-136 p.
- SAS, User's Guide, 1985. Manual y paquete para estadísticas. Cary, North Carolina. USA. 637 p.
- Tarín-Torres, G., 1992. Caracterización hidrodinámica en una formación vegetal denominada "mogote" con simulación de lluvia. Reserva de la biosfera de Mapimí. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Coahuila, México, 147 p.
- Viramontes, D. L. Descroix, A. Bollery y J. Poulénard. 2002. Comportement hydro-érosif des sols de la Sierra Madre Occidentale: Processus hydrologiques et évolution d'un milieu soumis ai la surexploitation. Géomorphologie : relief, processus, environnement. Vol. (3) : 239-252 p.

## **CAPÍTULO 4**

En esta parte, se hace referencia a la caracterización morfométrica y la red de drenaje en la cuenca del Río San Pedro, Conchos, que dio origen a la redacción de un artículo científico que fue publicado en la revista arbitrada *Tecnociencia* de la Universidad Autónoma de Chihuahua, con la participación del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, la Facultad de Zootecnia de la Universidad Autónoma de Chihuahua en coordinación con el Centro de Investigación Sobre Sequía (CEISS) del Instituto de Ecología A.C.

A continuación, se describen a detalle los pasos que se dieron para los cálculos de parámetros morfométricos, realizados en el marco de la tesis doctoral y dónde se utilizaron herramientas geoespaciales con el fin de desarrollar cada uno de los puntos propuestos en el artículo.

# **MORFOMETRÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO-CONCHOS, CHIHUAHUA.**

**Por:**

**OSCAR ALEJANDRO VIRAMONTES OLIVAS**

## **RESUMEN**

La caracterización de las propiedades morfométricas y la red de drenaje de una cuenca es el primer paso en la búsqueda de las relaciones entre esta y las condiciones climáticas y geológicas que determinan su evolución. En el presente trabajo, se analizaron los parámetros morfométricos de la cuenca del Río San Pedro, Conchos que establecen el comportamiento evolutivo de la misma. Se empleó el MDE escala 1:50,000 para cálculo de superficie, perímetro, forma, relieve y densidad de drenaje. Para forma, los índices de compacidad y elongación fueron: 2.41 y 0.56, respectivamente, indicando que la cuenca varía de oval-oblonga a rectangular que influye en la actividad dinámica del drenaje y en el tiempo de concentración de las aguas de lluvia al cauce principal. La curva y el análisis hipsométrico generado a partir de las altitudes, mostraron una estrecha correlación ( $R^2= 0.96$ ) indicando que la zona se encuentra en una etapa intermedia entre la fase de equilibrio relativo o de madurez y la de desequilibrio o juventud, implicando un potencial erosivo que no debe subestimarse. La densidad de drenaje ( $.80 \text{ km km}^{-2}$ ), muestra que la cuenca está pobremente drenada donde la textura y la vegetación juegan un papel importante en la retención de lluvia e infiltración con un tiempo de concentración de escurrimientos de 31 d. Las características morfométricas y la

red de drenaje tan solo atenúan los efectos y la vigorosidad de las crecidas importantes para estudios de eventos inesperados de precipitación en el año.

**Palabras clave:** morfometría, escurrimiento, red de drenaje.

# MORPHOMETRIC OF SAN PEDRO BASIN RIVER CONCHOS, CHIHUAHUA.

## ABSTRACT

The characterization of morphometric properties and the drainage web of a basin is the first step in the search of the relations between these and the climatic and geological conditions that determine its evolution. This work analyzed morphometric parameters in San Pedro Basin River Conchos, that establish its evolutionary behavior. A DEM (Digital Elevation Model) scaled to 1:50,000 was used to calculate (surface, perimeter, shape, relief and drainage density). For shape, compactness and elongation indexes (2.41 and 0.56 respectively) showed that its shape is oval – oblong to rectangular, which influences the drainage dynamic activity and the lag time of rain water in the principal channel. The curve and hypsometric analysis generated, based on the altitudes, showed a strong correlation ( $R^2= 0.96$ ), indicating that this zone is found in an intermediate stage between a relative balance or maturity and unbalance or youth, implicating an erosive potential that shouldn't be underestimated. The drainage density ( $.80 \text{ km km}^{-2}$ ) shows that the basin is poorly drained, where texture and vegetation play an important role in rain water retention and infiltration with a drainage concentration time of 31 d. It is concluded that the morphometric characteristics and the drainage web do not increase but lighten the effects and force of the floods important for yearly unexpected precipitation events studies.

**Keywords:** Morphometrics, drainage, drainage web.

## INTRODUCCIÓN

La subcuenca del Río San Pedro pertenece a la cuenca del Río Conchos, la más importante en el estado de Chihuahua, siendo un sistema fluvial donde sus atributos mayores se originan en la Sierra Madre Occidental y cuya función integral tiene que ver con la disponibilidad de agua y de otros recursos naturales (CNA, 2002). Los fenómenos hidrológicos que ocurren en una unidad fisiográfica conocida como cuenca y sus aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por la precipitación y donde los excedentes de agua convergen en un punto espacial único llamado cauce principal que influye en la dinámica de la zona (Maldonado *et al.*, 2001). El proceso de caracterización de las propiedades morfométricas de la red de drenaje, es el primer paso en la búsqueda de las relaciones entre éstos y las condiciones climáticas, geológicas e hidrológicas que determinan la evolución de la cuenca (Navarrete, 2004). Murillo (2002) explican, que la extracción de modelos derivados como el mapa de pendientes ha permitido reconocer rasgos morfológicos mediante técnicas de análisis geomorfométricos clásicos que incluyen la fotointerpretación, análisis del mapa geológico y campo. Para González (2004) el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y el empleo de modelos digitales de elevación (MDE) para el reconocimiento de rasgos morfológicos ha sido importante en los últimos 15 años, los cuales se han orientado a la caracterización medioambiental del terreno derivando redes de drenaje de una zona y surgiendo como una alternativa importante para manejar, planear y evaluar los recursos naturales de una cuenca (Pinedo *et al.*,

2007) por lo que es posible analizar y simular diversos procesos que ayuden a interpretar el origen y la dinámica de espacios naturales con una precisión razonable a bajo costo y tiempo de operación para el análisis de información (Everitt *et al.*, 2006).

El comportamiento de la red hidrológica, puede verse modificado por las propiedades morfométricas de las cuencas (forma, pendiente y red hidrológica) que tienen que ver con la respuesta del caudal recibido y pueden operar tanto para disminuir o intensificar las crecidas ya que éstas, actúan incrementando el volumen del flujo y la velocidad de su movimiento que son determinantes para evitar desastres en caso de fuertes lluvias (Robinson, 2000).

En base a lo anterior, el objetivo principal de esta investigación fue analizar las características morfométricas de la cuenca del Río San Pedro, Conchos, a partir de MDE y tecnología SIG para determinar parámetros de forma, relieve y red de drenaje.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo, se realizó en el Departamento de Agua y Suelo del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, ubicado en el Ejido Nuevo León, Mexicali en coordinación con el Centro de Investigación Sobre Sequía (CEISS) del Instituto de Ecología A.C., localizado en el kilómetro 33.3 de la Carretera Chihuahua-Ojinaga.

### **Descripción del Área de Estudio.**

El área de estudio (cuenca del Río San Pedro) tiene una superficie de 12, 492.53 km<sup>2</sup> (Figura 10) que representa el 4.84 % del estado de Chihuahua, ubicada en la Región Hidrológica 24, Río Bravo (INEGI, 1999). Se encuentra limitada al norte por la Sierra Azúl; al noroeste por la de Bernabé; al oeste por las estaciones de la Sierra Madre Occidental; al sureste por La Cieneguilla y al este por la Presa Francisco I. Madero (Ariel, 1985).

Para la parametrización, se obtuvo área y perímetro, longitud de la cuenca, elevación media, desnivel del cauce principal derivado a partir del MDE 1:50,000 (INEGI, 1999) con el apoyo de programas SIG.

### **Metodología.**

**a) Coeficiente de Compacidad (Cc) o Índice de Gravelius (1914).** Es la relación entre el perímetro de la cuenca y el de una circunferencia; sus resultados estarán basados en la clasificación de Campos (1992) mostrados en el Cuadro 4. Cuánto más cercano esté el índice a la unidad, la cuenca será más circular y por tanto más compacta, y en la medida que aumenta, la cuenca adquiere una forma más oval.

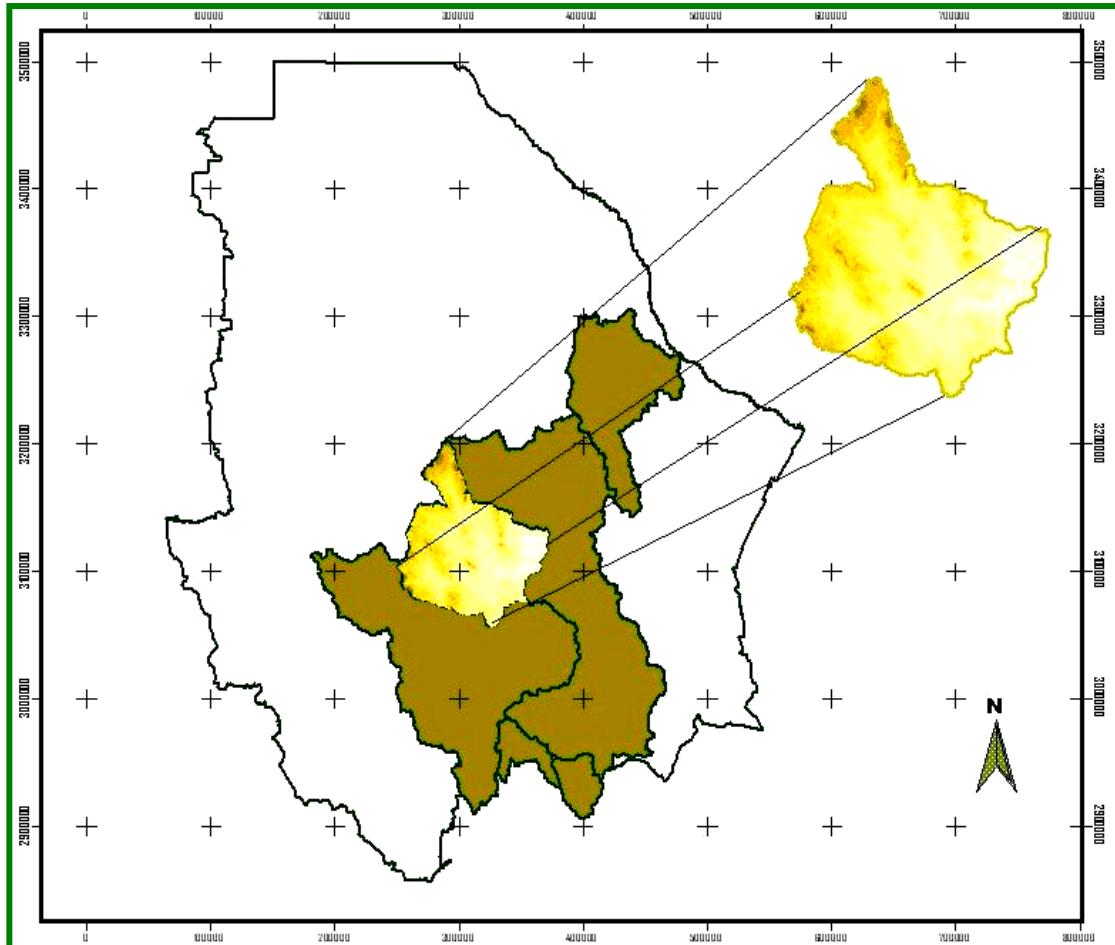


Figura 10. Localización de la cuenca del Río San Pedro, Conchos, Chihuahua.

CUADRO 4. FORMAS DE UNA CUENCA DE ACUERDO AL ÍNDICE DE COMPACIDAD.

Clase de Forma	Índice de Compacidad (Cc)	Forma de la Cuenca
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda
Clase II	1.26-1.50	Oval-redonda a oval oblonga
Clase III	1.51 a más de 2	Oval-oblonga a rectangular-oblonga

(Campos, 1992)

La fórmula de Gravelius, está dada por:

$$C_c = \frac{(0.282)(P_c)}{\sqrt{A}} \quad \text{Ec 1}$$

Donde:

$C_c$  = Coeficiente de compacidad.

$A$  = Área de la cuenca.

$P_c$  = Perímetro de la cuenca.

**b) Razón de Elongación ( $Re$ ).** Es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma. La fórmula propuesta es la propuesta por Shumm (1956):

$$Re = \frac{(1.128)(\sqrt{A})}{L_c} \quad \text{Ec 2}$$

Donde:

$Re$  = Relación de elongación.

$L_c$  = Longitud del cauce principal de la cuenca.

$A$  = Área.

La fórmula anterior, es la más extendida para calcular este índice debido a la alta correlación que guarda con la hidrología de la cuenca. Valores cerca a la unidad implicará formas redondeadas y cuanto menor sea a la unidad, será más alargada (González, 2004).

**c) Factor de forma ( $F$ ).** Este factor fue propuesto por Horton (1945) donde relaciona el área de la cuenca y la longitud de la misma. En este sentido, valores inferiores a la unidad indican cuencas alargadas y aquellos cercanos a uno, son redondeadas. Se expresa con la fórmula:

$$F = A / L^2 \quad \text{Ec 3}$$

Donde:

$A$  = Área de la cuenca.

$L^2$  = Longitud de la cuenca.

**d) Tamaño de la cuenca.** Para definirla, Campos (1992) propone una clasificación basada en la superficie de la misma (Cuadro 5).

### **Parámetros de Relieve.**

A mayor pendiente, corresponderá una menor duración de concentración de las aguas de esorrentía en la red de drenaje y afluentes del cauce principal, (Navarrete, 2004). Algunos parámetros destacan:

**a) Curva hipsométrica.** Permitirá caracterizar el relieve, obteniéndose a partir de las cotas de altitud registradas en los MDE 1:50,000 y complementado con la estimación de la superficie acumulada por cada cota.

**b) Pendiente media de la cuenca.** Es uno de los principales parámetros que caracteriza el relieve y permite hacer comparaciones entre cuencas para observar fenómenos erosivos que se manifiestan en la superficie.

La fórmula, es:

$$J = 100 * \frac{(\sum Li)(E)}{A} \quad \text{Ec 4}$$

Donde:

$J$  = Pendiente media de la cuenca (%).

$\sum Li$  = Suma de las longitudes de las curvas de nivel (km).

$E$  = Equidistancia entre curvas de desnivel (km).

$A$  = Superficie de la cuenca (Km<sup>2</sup>).

**c) Elevación media.** A partir de la curva hipsométrica, se determinará la elevación media equivalente al 50 % del área de la cuenca, donde en el eje "X" del gráfico, se aplicará el porcentaje.

**d) Análisis hipsométrico.** Con el propósito de comparar la cuenca con otros sistemas hidrográficos se empleó el criterio propuesto por Campos (1999) que considera la relación entre las alturas parciales y la altura total, así como las

CUADRO 5. CLASIFICACIÓN PROPUESTA PARA EL TAMAÑO DE CUENCAS.

Tamaño de la Cuenca (km <sup>2</sup> )	Descripción
Menos de 25	Muy Pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia Pequeña
500 a 2,500	Intermedia Grande
2500 a 5000	Grande
Más de 5000	Muy Grande

---

(Campos, 1992)

áreas parciales entre curvas de nivel y el área total. En base al análisis hipsométrico, podremos determinar el ciclo erosivo y la etapa evolutiva en que se encuentra la cuenca (Figura 11).

### **Red de Drenaje.**

Según Llamas (1993) la red de drenaje, es el arreglo de los canales que conducen las corrientes de agua dentro de la cuenca integrada por un río principal y una serie de tributarios cuyas ramificaciones se extienden hacia las partes más altas de la misma.

**a) Densidad de drenaje.** Definida para una cuenca como la longitud media de curso por unidad de superficie, calculándose mediante la expresión:

$$D = \frac{\sum L}{A} \quad \text{Ec 5}$$

Donde:

$D$  = Densidad de drenaje ( $\text{km}^{-1}$ ).

$\sum L$  = Suma de las longitudes de los cursos que se integran en la cuenca (km).

$A$  = Superficie de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

**b) Pendiente media del cauce principal.** Con este parámetro, se obtiene la pendiente media del río y su potencial para erosionar. Se expresa con “ $i$ ” y se calcula con la fórmula:

$$i = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{L_c} * 100 \text{ inv tg} \quad \text{Ec 6}$$

Donde:

$i$  = Pendiente media del cauce principal (%).

$H_{\max}$  = Altura máxima del afluente principal.

$H_{\min}$  = Altura mínima del afluente principal.

$L_c$  = Longitud del cauce.

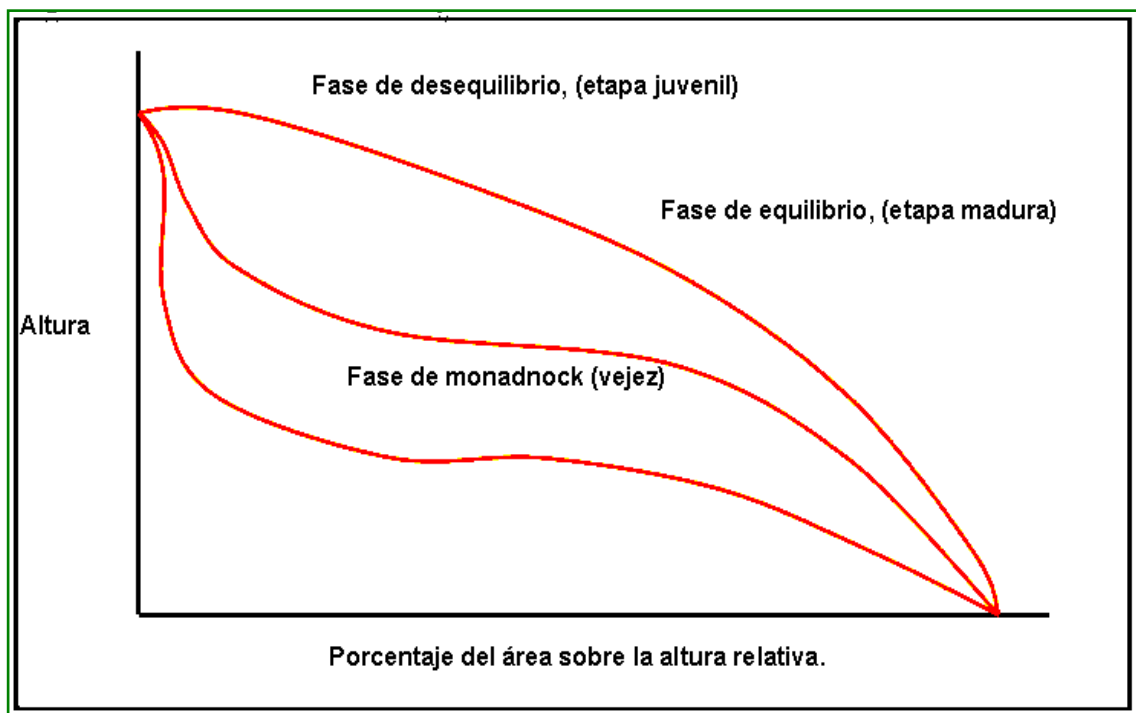


Figura 11. Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión (Senciales y Ferre, 1999).

Dependiendo de la media del cauce principal, la cuenca se clasifica según el (Cuadro 6) propuesto por Saavedra (1992).

**c) Criterio dos de pendiente del cauce principal.** Consiste en eliminar 15 % de la longitud del cauce, desde el punto más alto y 10 % de la longitud del cauce desde la salida (punto inferior) debido a la inconsistencia existente en la velocidad inicial de escurrimiento con la final:

$$\text{Criterio 2} = \text{LCP} - 25 \% \text{ de su longitud} \quad \text{Ec 6}$$

Donde:

*LCP* = Longitud del cauce principal.

**d) Tiempo de concentración.** Tiempo que tarda en llegar una gota de agua de lluvia desde el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca a la sección de salida, calculándose mediante la siguiente fórmula:

$$t_c = \frac{(4 \sqrt{S} + 1.5 L)}{(0.8 \sqrt{H})} \quad \text{Ec 7}$$

Donde:

*t<sub>c</sub>* = Tiempo de concentración (h).

*S* = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

*L* = Longitud del cauce principal (km).

*H* = Elevación media de la cuenca (km).

**e) Orden de la corriente.** Refleja el grado de ramificación dentro de la cuenca.

Horton (1945) clasificó en tres el orden de las corrientes, asignado el orden "1" a las más pequeñas, aquellas que no están ramificadas; el "2", a las que tienen ramificaciones o tributarios de primer orden; el "3", aquellas con dos o más tributarios de orden dos o menor. Por lo tanto el orden de la corriente principal

.CUADRO 6. VALORES PARA RELIEVE O TOPOGRAFÍA DEL TERRENO.

Pendiente en porcentaje	Tipo de terrenos
2	Llano
5	Suave
10	Accidente medio
15	Accidentado
25	Fuertemente accidentado
50	Escarpado
Mayor a 50	Muy escarpado

(Saavedra, 2001)

será un indicador de la magnitud de la ramificación y de la extensión de la red de drenaje dentro de la cuenca.

**f ) Centro de gravedad del cauce principal.** Es la distancia media o punto medio del cauce principal.

## RESULTADOS

Las características fisiográficas de la cuenca se explicaron a partir de parámetros que se obtuvieron mediante procesamiento de la información cartográfica y de los MDE (González, 2004). La subcuenca del Río San Pedro es un sistema hidrológico en el que se reflejaron acciones recíprocas entre parámetros y variables (índices de forma, relieve y densidad de drenaje). Las segundas, se clasificaron en acciones externas conocidas como entradas y salidas al sistema (Ortiz, 2004). En cambio, los parámetros permanecieron constantes en el tiempo y permitieron explicar las características morfométricas de la cuenca.

**Área y perímetro.** Dependiendo de la ubicación, el tamaño de la subcuenca influye en la escorrentía (Figura 12). El área obtenida a partir de MDE 1:50,000 fue de 12,492.53 km<sup>2</sup> y según Ortiz (2004) le corresponde denominarla “**cuenca**” y no sub-cuenca debido al tamaño en km<sup>2</sup> según la clasificación de Campos (1992). Sin embargo, la CNA (2002) difiriendo de lo anterior, registra a la cuenca en estudio, como subcuenca en base a efectos de índole administrativo, concluyendo que la terminología en muchos de los casos es relativa, pues no existe una idea exacta de lo que puede ser una micro, macro, sub o una simple cuenca. Finalmente, el perímetro encontrado fue 956.12 km, importante para los cálculos morfométricos posteriores.

**Parámetros de forma.** Para Llamas (1993) representa la configuración geométrica tal y como está proyectada sobre un plano horizontal. Esta forma, de acuerdo con González (2004) gobierna la tasa a la cual se suministra el

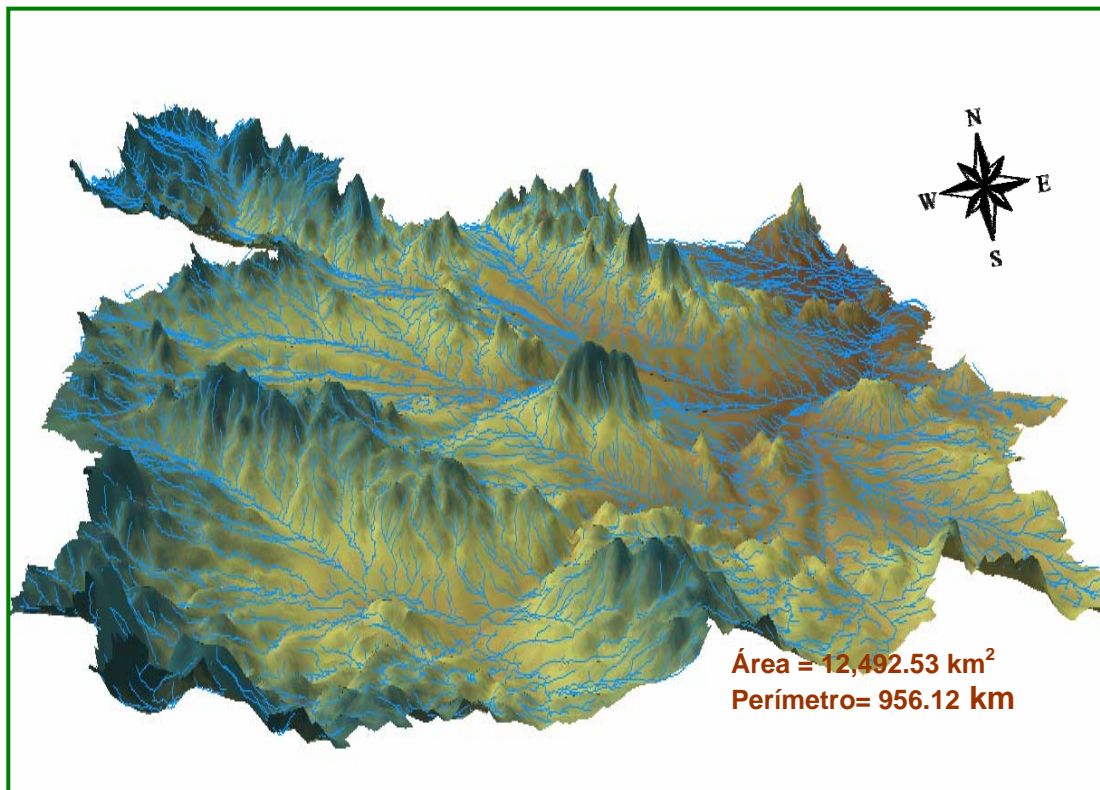


Figura 12. Morfometría del Modelo Digital de Elevación en 3d, que representa la cuenca del Río San Pedro, Conchos, Chihuahua.

agua al cauce principal, desde su nacimiento hasta su desembocadura.

**a) Coeficiente de compacidad (Cc).** El índice obtenido fue 2.41 (adimensional), indicando que la cuenca del Río San Pedro tiene forma oval-oblonga a rectangular alargada (Figura 13) lo que puede intensificar el vigor de avenidas, al menos en las desembocaduras y la onda de crecida que puede manifestarse fuertemente antes del cauce principal. El Cc, puede ser un indicador para prevenir inundaciones o llegadas repentinas de agua en ciertos poblados cercanos a cauces o arroyos, pues la duración de los escurrimientos al cauce principal puede ser más rápido (Maldonado *et al.*, 2001).

**b) Razón de Elongación (Re).** Se evaluó mediante el índice propuesto por Shumm (1956) que es la mejor correlación que guarda con la hidrología de la cuenca describiendo un aspecto de la organización de la red de drenaje; el valor encontrado fue 0.56, que implica ser una cuenca alargada y para Senciales y Ferre (1999) los índices más bajos a la unidad, son aquellos que se dan en áreas con relieve y pendientes pronunciadas. Lo anterior, coincide con los valores presentadas por Doffo y González (2005) al calcular la *Re* en varias sub cuencas del alto arroyo las Lajas, Argentina, los cuales mostraron una  $R^2=0.97$  entre el índice y la forma que pueden ser determinantes para hacer predicciones de posibles contingencias meteorológicas en una determinada zona.

**Factor de forma.** Aplicando la fórmula para conocer la relación entre el área de la cuenca y la longitud de la misma al cuadrado de Horton (1945) el índice obtenido fue .013

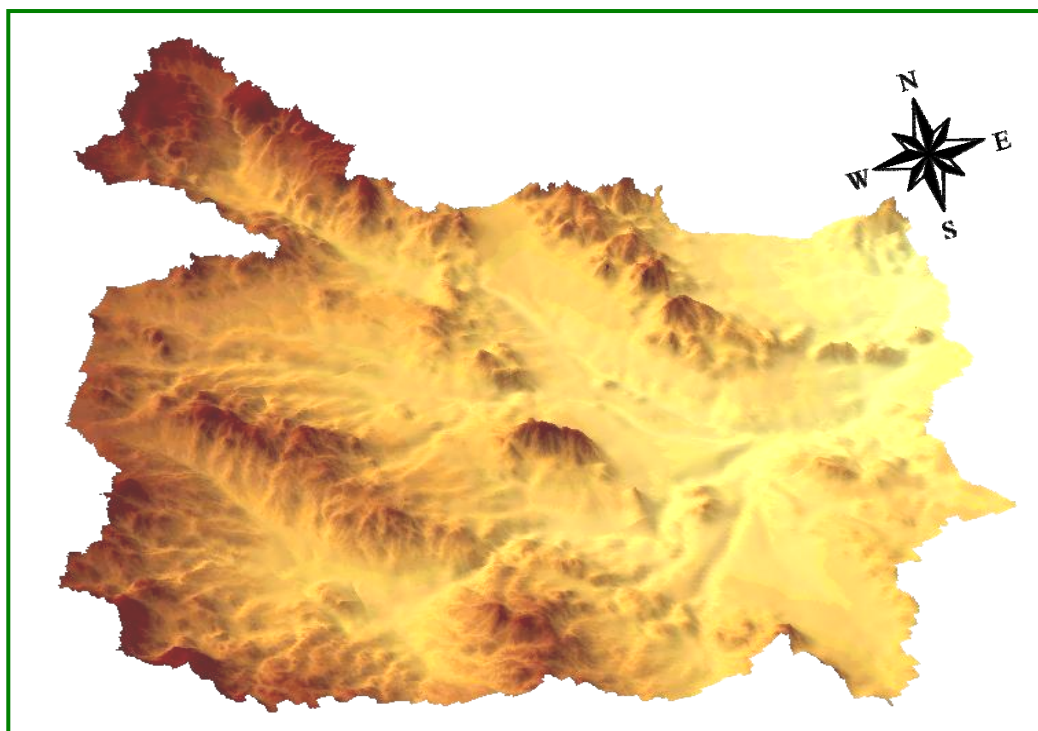


Figura13. Forma oval-oblonga a rectangular de la cuenca del Río San Pedro, Conchos, Chihuahua.

que corresponde a una cuenca alargada lo que hace a la cuenca del Río San Pedro una zona moderadamente retardada entre el momento de la precipitación y el de crecida en la desembocadura, pero al mismo tiempo, más acusada y súbita es la misma crecida y por tanto con alto riesgo de inundaciones (Guido y Busnelli, 1993). Sin embargo, la forma se considera una característica cuyo concepto es complejo con muchos atributos específicos lo que hace difícil caracterizar de manera real este parámetro mediante un simple resultado numérico.

### **Parámetros de Relieve.**

La mayor parte de los fenómenos hidrológicos se encuentran influidos por las geoformas del terreno. En el Cuadro 7 se presentan los valores correspondientes a los datos de la hipsometría progresiva los cuales se pueden modificar en función de la misma altura relativa, permitiendo estimar el estado dinámico potencial de la cuenca bajo la hipótesis de que esta función, relaciona altitud con el área que cambia con el tiempo en la medida que la cuenca sufre los efectos de la erosión.

**a) Curva y análisis hipsométrico.** Guerra y González (2002) atribuyen las diversas formas de la curva hipsométrica a una actividad diferencial entre los procesos de construcción tectónica y degradación por erosión, actividades no necesariamente relacionadas con la edad de la cuenca. El mapa base utilizado tiene equidistancias de 171 m (Figura 14) entre curvas de nivel, resultando 10 clases entre los 2743 y 1368 msnm, una entre 2743 y 2915 msnm y otra adicional entre 1368 y 1197 msnm.

CUADRO 7. HIPSOMETRÍA EN LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO-CONCHOS, CHIHUAHUA.

Intervalo entre curvas de nivel (msnm)	Cota media (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Área total (%)	Porcentaje de área acumulada (%)
2915-2743	2829.0	0.34	0.01	0.01
2743-2571	2657.0	11.13	0.10	0.11
2571-2399	2485.0	83.40	0.78	0.89
2399-2227	2313.0	362.71	3.39	4.28
2227-2056	2141.5	1027.66	9.61	13.89
2056-1884	1970.0	1655.14	15.48	29.37
1884-1712	1798.0	2576.62	24.10	53.47
1712-1540	1626.0	2545.23	23.80	77.27
1540-1368	1454.0	1787.27	16.71	93.98
1368-1197	1282.5	643.65	6.02	100

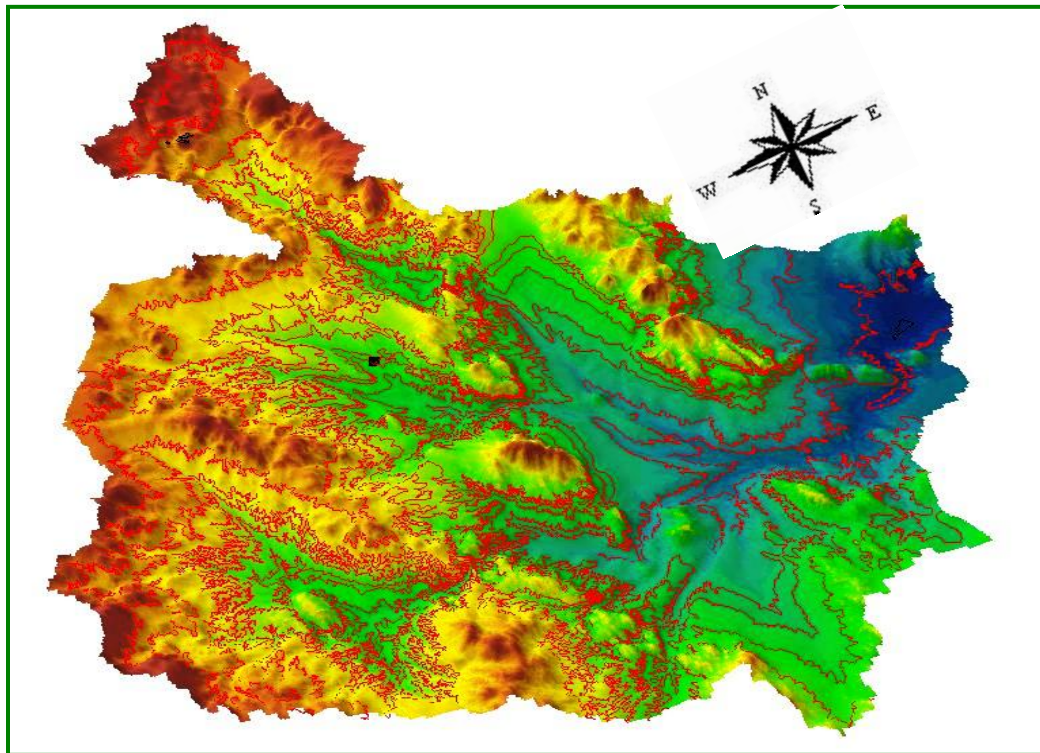


Figura 14. Curvas de nivel de la cuenca del Río San Pedro, Conchos, Chihuahua.

La distribución del análisis hipsométrico según el esquema de Strahler (1952) en la cuenca del Río San Pedro, se encuentra en una etapa intermedia entre la fase de equilibrio relativo o de madurez y la de desequilibrio o juventud, obviamente evolucionado hacia la etapa de madurez como se corrobora con el análisis hipsométrico representado en la Figura 15 y cuya  $R^2 = 0.96$ , indica una alta correlación con lo antes afirmado.

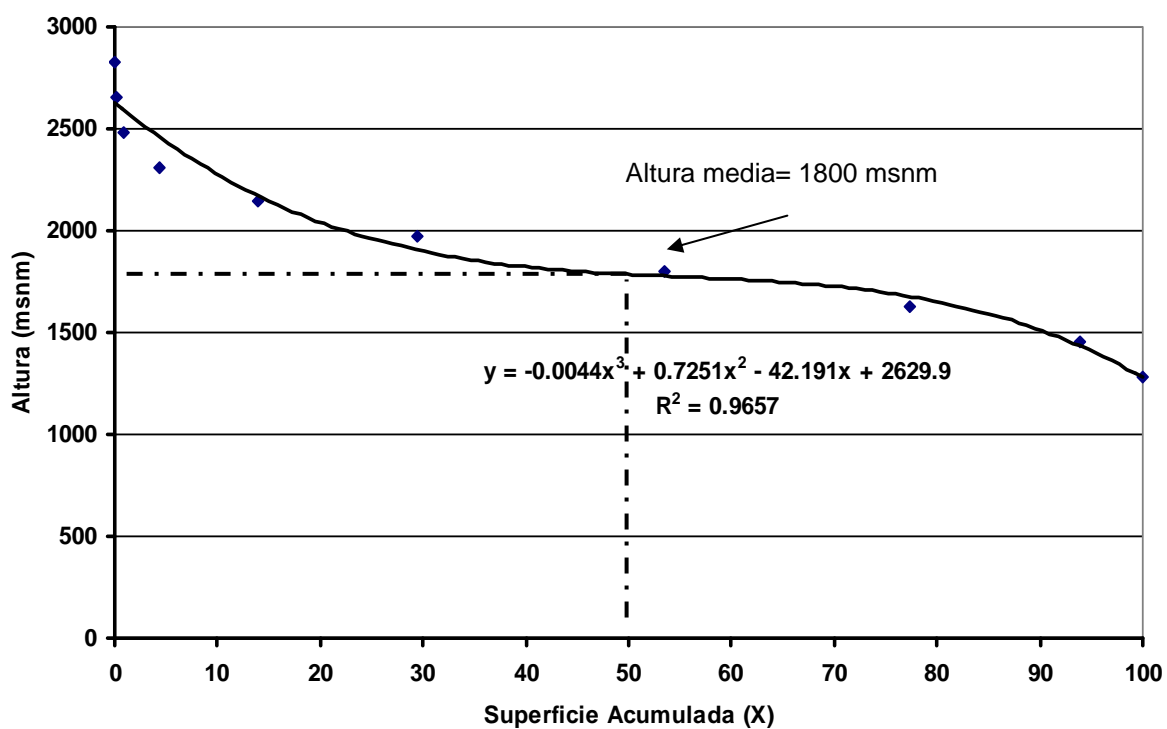
Ello también implicaría, un potencial erosivo que no debe despreciarse y cuya evidencia son las toneladas de asolve que se depositan en la presa Las Vírgenes y que generan también problemas al final del cauce principal al unirse con el Río Conchos.

**b) Elevación media.** A partir del 50 % de la superficie acumulada junto al trazo de una línea perpendicular al eje "X" hasta unirse a la curva hipsométrica y con otra horizontal al eje "Y", la elevación media de la cuenca fue de 1,800 msnm (Gráfica 17).

**c) Pendiente media de la cuenca.** Esta fue de 14.21 % (Cuadro 9) que representa un suelo accidentado a accidentado medio, que evidentemente favorece parcialmente la escorrentía (Senciales y Ferre, 2001). Sin embargo, habría que resaltar la presencia de cobertura boscosa que ocupa la parte alta y media de la cuenca, favoreciendo la infiltración gracias a la intercepción de la lluvia por la vegetación y en consecuencia la disminución en la velocidad del agua que escurre superficialmente.

#### **Parámetros Relativos a la Red de Drenaje.**

La red de drenaje es el sistema jerárquico de cauces, desde los pequeños surcos hasta los ríos que confluyen unos en otros configurando un



Gráfica 17. Distribución del análisis hipsométrico, cuenca del Río San Pedro, Conchos, Chihuahua.

CUADRO 9. DATOS PARA LA PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO SAN PEDRO-CONCHOS, CHIHUAHUA.

Suma de longitudes de curvas de nivel (km)	Equidistancia entre curvas de desnivel (km)	Superficie de la cuenca (km <sup>2</sup> )	Pendiente media de la cuenca (%)
88,812.07	0.20	12,492.53	14.21

colector principal de toda la cuenca, teniendo la función de transportar materia y energía en el interior de la misma (González, 2004).

**a) Densidad de drenaje (*Dd*).** El análisis morfométrico y la obtención de la red de drenaje (Figura 15) se realizó a partir de MDE 1:50,000 tanto si resultaban cauces permanentes como no, dado que en momentos de crecidas todos esos funcionan recolectando y transportando agua. Sí la *Dd* es alta, más rápido será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta evacuando el agua en menos tiempo. Hernández (2006) considera que valores próximos a  $0.5 \text{ km km}^{-2}$  corresponden a una cuenca pobremente drenada; de  $3.5 \text{ km km}^{-2}$  o mayores, indican una red de drenaje eficiente. La *Dd* en la cuenca del Río San Pedro fue de  $.80 \text{ km km}^{-2}$  con suelo de textura gruesa por el recubrimiento vegetal y la litología (Senciales y Ferre, 1992); el total de cauces fueron 7,245 con longitud de 4,973.54 km que hace una cuenca moderadamente drenada.

En general, la *Dd* aún y cuando se obtuvo el promedio varía dependiendo de la pendiente del terreno, ya que en zonas llanas, cultivadas o urbanizadas (Delicias) la densidad es menor y donde la topografía es accidentada como en la ciudad de Chihuahua la *Dd* puede ser mayor. Como se ha observado la presencia de avenidas fuertes después del paso de una tormenta repentina, obedece también a la influencia de factores litológicos y edáficos donde la permeabilidad del suelo juega un importante papel (Cuesta, 2001).

**b) Pendiente media del cauce principal (*PMCP*).** Con datos de altura máxima del afluente principal (2,700 msnm) de la cuenca hasta la finalización del cauce principal (altura mínima) a 1200 msnm y la longitud del cauce principal (223 km)

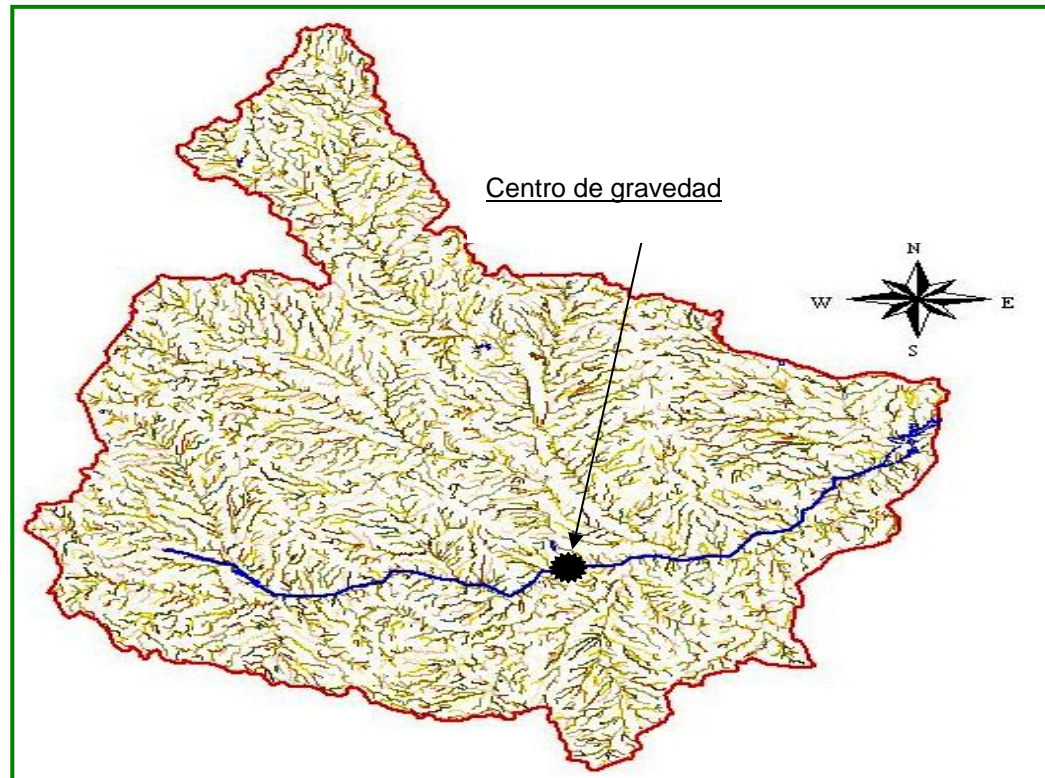


Figura 15. Distribución de los cauces secundarios y punto medio del cauce principal en la cuenca del Río San Pedro-Conchos, Chihuahua.

se obtuvo la pendiente media (67 %) que representa 33.8 ° del ángulo del terreno, favoreciendo parcialmente el flujo de las corrientes del Río San Pedro en periodos de lluvia con presencia de avenidas fuertes hacia el final de su trayecto. Estos resultados coinciden de manera significativa ( $R^2=0.95$ ) con los reportados por INEGI (1999) mencionando que la *PMCP* es de 47 % (26°).

**c) Orden de la corriente.** En igualdad de condiciones la relación que guarda el área, clima y sustrato cuanto más alto sea el orden de la cuenca, mayor será el grado de desarrollo fluvial (Horton, 1945). Por tanto, debido a la tipología del sustrato y a la cobertura vegetal el tramo alto de la cuenca del Río San Pedro tiene mayor pluviosidad haciendo prever una mayor jerarquización de las partes bajas o planas, lo que hace que las avenidas provenientes de las partes altas pueden ser motivo de inundaciones en condiciones de lluvias abundantes.

Finalmente, la cuenca del Río San Pedro presenta escorrentía superficial moderada; con drenaje dentritico en forma de hoja de orden seis y un centro de gravedad de su cauce principal de 116.5 km haciendo de esta cuenca una zona que debe estar constantemente monitoreada.

**d) Tiempo de Concentración (*tc*).** Según Cuesta (2001) la densidad de drenaje, afecta al tipo de escorrentía y así en zonas de alta densidad, la escorrentía recorre la superficie rápidamente rebajando el *tc* e incrementando el pico de crecida al haber menos infiltración. La cuenca del Río San Pedro, registró un *tc* de 744.47 h (31 d) permitiendo altas tasas de infiltración y alimentación del flujo subsuperficial gracias a los diversos valores de pendiente en buena parte de la cuenca, a la concentración parcelaria y los usos agrícolas

que han supuesto una simplificación y concentración de los cursos de agua (Presa "Las Vírgenes y el Distrito de Riego 005).

**e) Criterio 2 de pendiente del cauce principal.** Fue de 167.25 km, indicando que dentro de esa distancia las aguas de la cuenca del Río San Pedro, tendrán equilibrio en el flujo del río ya que al inicio del mismo, la velocidad es reducida y al final demasiado fuerte, por lo que este criterio corrige esa diferencia de velocidad.

## CONCLUSIONES

- 1) Del análisis morfométrico de la cuenca del Río San Pedro y la red de drenaje, se desprende que la concentración de las aguas precipitadas se ve favorecida por las pendientes y en parte por los índices de compacidad y elongación que determinan la forma de la cuenca y las condiciones de evolución de la misma.
- 2) Los eventos pluviométricos que se presentan en verano, pueden ser peligrosos debido a las condiciones orográficas superiores que facilitan una rápida concentración de las aguas.
- 3) La interpretación de los índices morfométricos deben tomarse con cautela, porque pueden representar valores subjetivos; sin embargo, la información aportada, ofrece un panorama general que puede ayudar a formar diversos escenarios necesarios para prevenir contingencias y tomar medidas para preservar los recursos naturales de la zona.
- 4) En las áreas de confluencia, los afluentes muestran mayor vigorosidad de sus crecidas que el colector principal.
- 5) La densidad de drenaje es influenciada por una amplia cobertura vegetal y litología dura, además de regular tasas de infiltración y alimentación del flujo subsuperficial que favorecen el incremento del tiempo de concentración y el atenuamiento del caudal punta.
- 6) En general, las características morfométricas no incrementan, sino más bien, atenúan los efectos y la vigorosidad de las crecidas en la cuenca del Río San Pedro, Conchos, Chihuahua.

## LITERATURA CITADA

- Ariel, C. 1985. Estudio geohidrológico de la zona cuenca alta del río San Pedro, Chihuahua. Realizado para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica, Dirección General de Control de Ríos e Ingeniería de Seguridad Hidráulica, Subdirección de Geohidrología. Capítulo 8 en: CNA. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero alto río San Pedro, Estado de Chihuahua. Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. México, D.F.
- Campos, A. 1999. Proceso de Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 2ª. ed. San Luis Potosí, México. 33-34 p.
- Campos, A. 1992. Proceso del Ciclo Hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 1ª ed. Sal Luis Potosí, México. 22-23 p.
- CNA. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero alto río San Pedro, Estado de Chihuahua. Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. México, D.F.
- Cuesta, M.J. 2001. Dinámica erosiva en los paisajes de la cuenca del río Guadajoz (Córdoba y Jalén). Córdoba, Servicios de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 226 p.
- Doffo, N. y B. González. 2005. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: un análisis estadístico. Rev. Asoc. Geol. Argent. Vol. 60 No. 1. 88-95 p.
- Everitt, J.H., C. Yang, R.S. Fletcher and D.L. Drawe. 2006. Evaluation of high-resolution satellite imagery for assessing rangeland resources in South Texas. Rangeland Ecol. Manage. 59 (4):30-37 p.
- González, M. A. 2004. Análisis morfométrico de la cuenca y de la red de drenaje del río Zadorra y sus afluentes aplicado a la peligrosidad de crecidas. Boletín de la A.G.E. No. 38. 311-329 p.
- Guerra, F. y González J. 2002. Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada. Universidad de los Andes, Departamento de Ciencias Sociales. Geoenseñanza. Vol 7 (1-2). 88-108 p.
- Guido, E y M, Busnelli. 1993. Criterios morfométricos para la evaluación de la torrencialidad de una cuenca hídrica (Río Las Cataras, Catamarca. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos en Mendoza. Vol. 6: 116-122 p.

- Hernández, L.G. 2006. Modelación de la interacción río–acuífero y su aplicación a un caso práctico. Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM).
- Horton, R. 1945. Erosional development of streams and drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, 56. 275-370 p.
- INEGI. 1999. Estudio hidrológico del estado de Chihuahua. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática y Gobierno del Estado de Chihuahua. 1ª Edición, México. 244 p.
- Llamas, J. 1993. Hidrología General, Principios y Aplicaciones. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. Bilbao, España. 402 p.
- Maldonado de León, O.A., O.L. Palacios, J.L. Oporeza, R. G Springall y D.S. Fernández. 2001. Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. *Agrociencia* 35 (3). 335-345 p.
- Martínez-Gamiño, M.A. y P.M. Walthall. 2000 a. Propiedades físicas, químicas y mineralógicas en el encostramiento de los suelos de México y Louisiana, EU. *Terra Latinoamericana*. Vol (18), 3: 179-185 p.
- Murillo, S. 2002. Estudio del efecto del cambio de uso de suelo en el escurrimiento en la Subcuenca 24bf Monterrey, aplicando un sistema de Información geográfica. Tesis, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Monterrey. 10-12 p.
- Navarrete, M. D. 2004. Propuesta metodológica para el análisis territorial en la cuenca hidrográfica del Estero El Peral, Comuna de Carahue, Informe de resultados en IX Región de Chile. Universidad Católica de Temuco, Chile. Facultad de Ciencias Ambientales.
- Ortiz, L.M. 2004. Evaluación hidrológica en *Revista Hidro Red*, Red Latinoamericana de Micro Hidroenergía, Lima Perú. Vol (2): 2-10 p.
- Pinedo, A.C., A.A. Pinedo, R.M. Quintana, S.M. Martínez. 2007. Análisis de áreas deforestadas en la región centro-norte de la Sierra madre Occidental, Chihuahua, México. *Tecnociencia* Vol (1): 37-38 p.
- Robinson, M.A. 2000. Geomorfología del sector ibérico valenciado entre los ríos Mijares y Tina. Departamento de Geografía, Universidad de Valencia, España. 217 p.

- Saavedra, J. 2001. Planificación Ambiental de los Recursos Forestales en la Región de la Araucanía, Chile. definición de Unidades Homogéneas de Gestión. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 342 p.
- Senciales, J.M. y E. Ferre. 1999. Análisis morfométrico de la cuenca del río Benamargosa (provincia de Málaga) en López B. F., C. Conesa y M.A. Romero: Estudios de Geomorfología en España. Actas de la II Reunión Nacional de Geomorfología, Murcia, S.E.G. 365-375 p.
- Shumm, S. 1956. The fluvial system. A Wiley-interscience Publication. John Wiley and Sons, Inc. New York. 338 p.