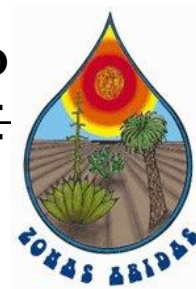




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS



**EFFECTO DEL CAMBIO TEMPORAL DE LA VEGETACIÓN
SOBRE LA PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA
CUENCA DEL RÍO SEXTÍN**

**TESIS
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

PRESENTA:

RAMÓN TRUCÍOS CACIANO

Bermejillo, Dgo. 5 de Diciembre de 2005



**EFFECTO DEL CAMBIO TEMPORAL DE LA VEGETACIÓN SOBRE LA
PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO SEXTÍN.**

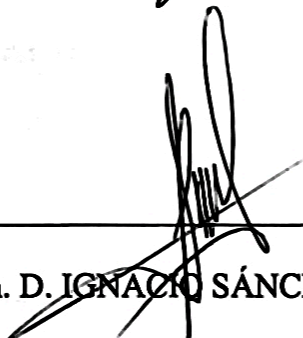
Tesis realizada por Ramón Trucíos Caciano bajo la dirección del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado
de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE EN ZONAS ARIDAS**

DIRECTOR: _____


Ph. D. JUAN GUILLERMO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ

ASESOR: _____


Ph. D. IGNACIO SÁNCHEZ COHEN

ASESOR: _____


M. C. JOSÉ LUIS BLANDO NAVARRETE

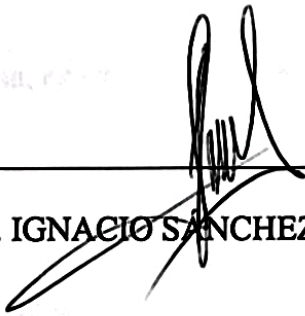
**EFFECTO DEL CAMBIO TEMPORAL DE LA VEGETACIÓN SOBRE LA
PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO SEXTÍN.**

El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de Ramón Trucíos Caciao autor de la presente tesis de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas estuvo constituido por:

PRESIDENTE: _____


Ph. D. JUAN GUILLERMO MARTÍNEZ RODRÍGUEZ

ASESOR: _____


Ph. D. IGNACIO SÁNCHEZ COHEN

ASESOR: _____


M. C. JOSÉ LUIS BLANDO NAVARRETE

DEDICATORIA

Con gran amor, cariño y respeto a mi esposa y a mi hijo que me impulsaron durante mis estudios.

A mis padres por su cariño, comprensión y apoyo incondicional.

A mis hermanos que junto con su familia me dieron ánimos a pesar de la distancia.

A la familia de mi esposa, especialmente a mi suegros por su apoyo.

A mis familiares que gracias a todos ellos forme un carácter que me permitió salir adelante en mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo en especial a la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas por permitirme cumplir con esta meta en mi formación profesional.

A la Comisión Nacional del Agua por proporcionarme la información necesaria para el desarrollo del presente estudio.

Al Ph. D. Juan Guillermo Martínez Rodríguez por ser más que un Director de Tesis, un buen amigo.

Al personal de URUZA por las atenciones brindadas en la Universidad.

A mis compañeros de la maestría por brindarme su compañerismo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Nombre: Ramón Trucíos Caciano

Lugar de Origen: Puebla, Puebla.

Nivel académico:

- Ingeniero Agrónomo en Sistemas Agrícolas de Zonas Áridas en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo en Bermejillo, Dgo. 1995-2000.
- Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo en Bermejillo, Dgo. 2003-2004.

Experiencia laboral

- Secretaria de Agricultura Ganadería y Desarrollo Rural (SAGARPA), encargado del Municipio Huatlatlahuca, Puebla como Prestador de Servicios Profesionales en el programa PRODESCA de mayo del 2002 a enero del 2003.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Dirección regional norte sede en Gómez Palacio, Dgo. Con contrato eventual como jefe de campo asignado a Tlahualilo de febrero a mayo del 2004 en los censos económicos del 2004.
- Despacho de asesoría técnica agropecuaria en Bermejillo, Dgo como proyectista de enero a mayo del 2005.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro Nacional de Investigación Disciplinaria Relación Agua - Suelo – Planta – Atmósfera (CENID-RASPA) en Gómez Palacio, Dgo como asistente de investigación desde mayo del 2005 hasta la fecha.

Esta tesis forma parte del proyecto CONAFOR – 2003 – C03: 10324 – Degradación de los ecosistemas forestales: efecto de la deforestación en la producción del agua y sedimentos, el cual, fue financiado por el Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la innovación Tecnológica Forestal CONAFOR – CONACYT.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS.....	14
General	14
Específicos.....	14
META.....	15
REVISIÓN DE LITERATURA	16
CONCEPTOS BÁSICOS	16
Cuenca.....	16
Cuenca hidrológica.....	16
Balance hídrico.....	17
Modelo Digital de Elevación	18
MODELOS HIDROLÓGICOS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	19
Modelos Hidrológicos	20
Modelación de Cuencas.....	22
Descripción de Proceso.....	22
Escala espacial	23
Escala de tiempo	24

Uso de Suelo.....	25
Efectos de agregación de atributos de paisaje sobre la respuesta de cuencas.	26
Influencia de la vegetación sobre el escurrimiento.....	27
Cobertura Vegetal y Uso de Modelos de Simulación.....	28
DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT	31
Variables a calcular por el modelo	32
➤ Balance Hídrico.....	32
➤ Escurrimiento superficial	33
➤ Infiltración.....	34
➤ Flujo lateral o subsuperficial	34
➤ Percolación.....	35
➤ Flujo de retorno.....	36
➤ Evapotranspiración.....	36
➤ Variables climáticas	38
➤ Sedimentación	38
Sensibilidad del rendimiento de agua y sedimentos a valores de parámetros.....	40
Calibración del Modelo	42
Desviación de volúmenes de escurrimiento (D_v).....	42
Coeficiente de Nash – Sutcliffe (R^2).....	43
Coeficiente de ganancia de la media diaria (DG)	43
Tasa de cambio de vegetación	44
Comportamiento de la vegetación (ecuación).....	45
Modelo de estimación del proceso de deforestación	46
Modelo de estimación de proceso de impacto pecuario	47
MATERIALES Y MÉTODOS	49
INFORMACIÓN BÁSICA DE LA CUENCA.....	49
Localización	49
Fisiografía.....	50
Geología	50
Clima	51
Hidrología.....	52

Edafología	53
Uso de Suelo y Vegetación.....	57
Modelo Digital de Elevación	63
Análisis de cambio de uso de suelo.....	64
Serie I (INEGI)	64
Serie I (INEGI digitizada por INE)	65
Serie II (INEGI insumo base para el IFN 2000).....	65
Procesamiento del Modelo SWAT	66
Mapa Digital de Uso de Suelo y Vegetación	71
Mapa Digital de Suelos.....	73
Unidades de Respuesta Hidrológica	79
Estaciones Meteorológicas	80
Procesamiento	82
Configuración y corrida de SWAT.....	83
Simulación de la Evapotranspiración	85
Calibración del modelo.....	86
Validación del modelo	87
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
CALIBRACIÓN.....	89
VALIDACIÓN.....	94
ESCURRIMIENTO EN FUNCION DE LA VEGETACIÓN.....	97
Representación en los diferentes tamaños de subcuenca	99
Comparación de escurrimiento de Serie I y Serie II	101
ESTIMACIÓN DEL CAMBIO DE VEGETACIÓN.....	104
Comportamiento de la vegetación	105
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	111

CONCLUSIONES.....	111
RECOMENDACIONES.....	112
LITERATURA CITADA.....	113
ANEXO 1	121
ANEXO 2	135

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tipos de Uso de suelo y Vegetación (Serie I y Serie II) en la Cuenca del Río Sextín.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 2. Reclasificación de polígonos de Uso de Suelo y Vegetación (Serie II y Serie I) para SWAT.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 3. Grupo hidrológico del suelo según texturas</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 4. Estaciones Meteorológicas seleccionadas para modelación del clima.</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 5. Configuraciones para calibrar la Cuenca del Río Sextín.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 6. Configuraciones para validar la Cuenca del Río Sextín.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 7. Características de las divisiones en elementos geométricos de la cuenca del Río Sextín.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 8. Resultados de calibración de la vegetación de 1976.</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 9. Resultados de calibración de la vegetación de 1993.</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 10. Resultados de validación de la vegetación de 1976.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 11. Resultados de validación de la vegetación de 1993.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 12. Datos de salida estimados del modelo SWAT para la vegetación de 1976 (Serie I) usando el periodo de clima de 1975-1979.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 13. Datos de salida del modelo SWAT para la vegetación de 1993 (Serie II) usando el periodo de clima de 1975-1979.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 14. Cambio de vegetación y tasa de cambio entre Serie I y Serie II de INEGI.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 15. Comportamiento del cambio de la vegetación entre la Serie I - Serie II y obtención de la ecuación que lo describe.</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 16. Cambio de vegetación entre Serie I y Serie II de INEGI por categorías de vegetación (ha)....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 17. Cambio de vegetación según el modelo de estimación del proceso de deforestación entre Serie I y Serie II de INEGI por categorías de vegetación.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 18. Cambio de vegetación según el modelo de estimación del proceso de impacto pecuario entre Serie I y Serie II de INEGI por categorías de vegetación.</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 19. Calibración con tamaño de cuenca 12,500 ha, periodo 1975-1979, vegetación 1976, 21 drenajes generados.</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 20. Validación con tamaño de cuenca 12,500 ha, periodo 1981-1985, vegetación 1976, 21 drenajes generados.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 21. Calibración con tamaño de cuenca 25,000 ha, periodo 1975-1979, vegetación 1976, 11 drenajes generados.</i>	<i>124</i>

<i>Tabla 22. Validación con tamaño de cuenca 25,000 ha, periodo 1981-1985, vegetación 1976, 11 drenajes generados.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 23. Calibración con tamaño de cuenca 75,000 ha, periodo 1975-1979, vegetación 1976, 3 drenajes generados.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 24. Validación con tamaño de cuenca 75,000 ha, periodo 1981-1985, vegetación 1976, 3 drenajes generados.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabla 25. Calibración con tamaño de cuenca 12,500 ha, periodo 1981-1985, vegetación 1993, 21 drenajes generados.</i>	<i>128</i>
<i>Tabla 26. Validación con tamaño de cuenca 12,500 ha, periodo 1991-1995, vegetación 1993, 21 drenajes generados.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 27. Calibración con tamaño de cuenca 25,000 ha, periodo 1981-1985, vegetación 1993, 11 drenajes generados.</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 28. Validación con tamaño de cuenca 25,000 ha, periodo 1991-1995, vegetación 1993, 11 drenajes generados.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 29. Calibración con tamaño de cuenca 75,000 ha, periodo 1981-1985, vegetación 1993, 3 drenajes generados.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 30. Validación con tamaño de cuenca 75,000 ha, periodo 1991-1995, vegetación 1993, 3 drenajes generados.....</i>	<i>133</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Representación isométrica y bidimensional del MDE.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2. Esquema de procesamiento de información del modelo SWAT</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3. Modelo de procesos de deforestación. En este modelo, se consideran las categorías para resaltar las pérdidas y ganancias de las cubiertas dominadas por formas de vida arbórea (bosques y selvas), expresado en porcentaje de cambio entre el periodo de estudio.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4. Principales procesos tanto por la actividad pecuaria (incluyendo las categorías de vegetación secundaria) como por la agrícola (1 = alteración; 2 = sucesión secundaria; 3 = falso cambio; 4 = procesos de degradación por cobertura antrópica; 5 = deforestación por cobertura antrópica; 6 = degradación por ganadería; 7 = deforestación por ganadería; 8 = re-vegetación).</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5. Localización de la Cuenca del Río Sextín dentro de la cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas... </i>	<i>49</i>
<i>Figura 6. Distribución de las Unidades Edafológicas en la Cuenca del Río Sextín</i>	<i>54</i>
<i>Figura 7. Distribución de los diferentes Usos de Suelo y Vegetación de la Serie I en la Cuenca del Río Sextín.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 8. Distribución de los diferentes Usos de Suelo y Vegetación de la Serie II de la Cuenca del Río Sextín.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 9. Modelo Digital de Elevación de la Cuenca del Río Sextín.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 10. Comparación entre superficies de tipos de vegetación en formación principal de Serie I con la Serie II de INEGI</i>	<i>66</i>
<i>Figura 11. Ventana de inicio de SWAT.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 12. Ventana de procesamiento de MDE en SWAT.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 13. Delimitación de área y elementos geométricos a partir del Modelo Digital de Elevación</i>	<i>69</i>
<i>Figura 14. Salida del drenaje principal de la Cuenca del Río Sextín.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 15. Mapa digital de Uso de suelo y Vegetación Reclasificado para la Serie II.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 16. Ventana de definición del de Uso de la Tierra y Tipos de Suelo.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 17. Ventana de creación / edición propiedades de suelos.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 18. Mapa digital de Edafología Reclasificado.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 19. Selección de distribución y asignación de HRU</i>	<i>80</i>
<i>Figura 20. Ubicación de las estaciones climatológicas respecto a la Cuenca del Río Sextín</i>	<i>81</i>
<i>Figura 21. Ventana para definición de datos climáticos.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 22. Ventana principal de configuración de corrida de SWAT.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 23. Corriendo la modelación de SWAT.....</i>	<i>85</i>

<i>Figura 24. Volumen de escurrimiento anual en millones de metros cúbicos (Mm³) para la cuenca en estudio.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 25. Tamaños de elementos geométricos generados por el modelo.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 26. Volumen de escurrimiento anual en millones de m³ (Mm³) para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en calibración de la vegetación de 1976 (Serie I).</i>	<i>91</i>
<i>Figura 27. Volumen de escurrimiento anual en Mm³ para valores simulados y observados en M1, 92</i>	<i>92</i>
<i>Figura 28. Volumen de escurrimiento anual en Mm³ para valores simulados y observados en M1, 94</i>	<i>94</i>
<i>Figura 29. Volumen de escurrimiento anual en Mm³ para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en validación de la vegetación de 1993 (Serie II).</i>	<i>95</i>
<i>Figura 30. Volumen de escurrimiento anual en Mm³ para comparar valores observados y los simulados en M1, M2 y M3 (Serie I).</i>	<i>97</i>
<i>Figura 31. Volumen de escurrimiento anual en Mm³ para comparar valores observados y los simulados en M3, M2 y M1 (Serie II).</i>	<i>98</i>
<i>Figura 32. Estaciones climatológicas y distribución de la precipitación (mm) de acuerdo al modelo SWAT en los diferentes arreglos geométricos.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 33. Escurrimiento modelado (m³s⁻¹) con SWAT en los diferentes tamaños de subcuencas en base a los datos de clima ingresados.</i>	<i>101</i>
<i>Figura 34. Relación 1:1 del volumen de escurrimiento en Mm³ para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en calibración de la vegetación de 1976.</i>	<i>135</i>
<i>Figura 35. Relación 1:1 del volumen de escurrimiento en Mm³ para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en calibración de la vegetación de 1993.</i>	<i>136</i>
<i>Figura 36. Relación 1:1 del volumen de escurrimiento en Mm³ para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en validación de la vegetación de 1976.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 37. Relación 1:1 del volumen de escurrimiento en Mm³ para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en validación de la vegetación de 1993.....</i>	<i>138</i>

RESUMEN

EFFECTO DEL CAMBIO TEMPORAL DE LA VEGETACIÓN SOBRE LA PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO SEXTÍN

Para la modelación del escurrimiento en la Cuenca del Río Sextín se utilizó el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT). La calibración y validación del modelo se realizó en diferentes configuraciones de la cuenca, para el cálculo del escurrimiento, teniéndose en éstos coeficientes de determinación de 0.69 a 0.87% para 1976 y de 0.72 a 0.84% para 1993, tomando como base de comparación el escurrimiento medido en la estación hidrométrica Sardinas. El arreglo geométrico que mejor explicó el escurrimiento observado fue el de mayor tamaño. El cambio de vegetación tuvo un impacto negativo en coberturas como bosque de pinos y pastizal, esto probablemente debido a la explotación forestal y carga animal mayor al índice de agostadero, por otro lado se presentó crecimiento en coberturas como chaparral y bosque bajo abierto. Esto provocó una disminución en la producción estimada de agua en un 14% (42.05 Mm³).

Palabras clave: SWAT, producción de agua, escurrimiento.

ABSTRACT

THE EFFECT OF SEASONAL VEGETATION CHANGE ON WATER YIELD FROM THE SEXTIN RIVER WATERSHED

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic simulation model was used to estimate surface runoff coming out of the Sextin River watershed. SWAT model calibration and validation was performed in three different watershed configurations. The Nash-Sutcliffe model coefficients (R^2) were 0.69 to 0.87 for model calibration (1976) and 0.72 to 0.84 for model validation (1993), taking into consideration observed and simulated surface runoff data. The best model coefficient was obtained in both cases by the simplest configuration (15% drainage area). Vegetation change had a negative impact on pine forest and grassland vegetation cover. This effect might be due to deforestation and overgrazing on those lands. On the other hand, there was an increase in shrub land (chaparral) as well as in open low forest, which resulted in a 14% decrease of water yield (42.05 Mm³).

Key words: SWAT model, water yield, GIS, surface runoff

INTRODUCCIÓN

Las prácticas inadecuadas de manejo de recursos naturales asociadas a las actividades humanas en los diferentes ecosistemas han ocasionado graves problemas de deterioro del ambiente. Dicho deterioro se manifiesta no solo en degradación de suelos, erosión, pérdida de vegetación, pérdida de hábitat de fauna silvestre, etc. sino también en la magnitud (extensión superficial) que estos procesos representan.

El deterioro se puede considerar como el rápido avance de la frontera agrícola, ganadera y urbana, que pone en serio peligro el mantenimiento de ecosistemas complejos (Koning *et al.*, 1998).

En nuestro país el cambio de uso de suelo ha experimentado diferencias sustanciales a un periodo corto de tiempo (1993-2000). En éste, el bosque desapareció a una tasa de 0.79% o 2,672 km² al año; las selvas a tasa de 1.58%; y los matorrales a 0.48%. La actividad que se considera responsable es la ganadería, la cual incremento en este mismo periodo su superficie para pastizales en 57,000 km² o tasa de 4.07% (SEMARNAT, 2003).

El papel fundamental que desempeña la vegetación, principalmente la arbórea, sobre el escurrimiento es modificar el acceso de agua a los cauces dotando de mayor capacidad de infiltración a los suelos, interceptando la precipitación, y efectuando el proceso de transpiración; disminuyendo así las aportaciones de superficie e incrementando el abastecimiento de depositos subterrneos.

De esta manera, las condiciones climáticas y edafológicas regulan las condiciones hidrológicas de una región, así como también la cobertura vegetal de la

misma, por tal motivo, los cambios inducidos por el hombre en cobertura vegetal a través de cambio de uso del suelo, sobrepastoreo y explotación forestal están relacionados en la formación de escurrimientos.

En diferentes estudios se ha mostrado la importancia que tiene la Sierra Madre Occidental como productora de agua (volumen de escurrimiento) para todo el noroeste de México así como por su producción ganadera y forestal. Sin embargo, el estado de degradación debido al sobrepastoreo (65% mayor de capacidad animal en los estados del norte) y la deforestación (tasa de deforestación anual en México es de $1.07\% = 631,000 \text{ ha año}^{-1}$) es grave (SEMARNAT, 2003). El riesgo de desequilibrio del balance hidrológico de esta zona debido al uso abusivo del medio y sus consecuencias a nivel regional y nacional representan un serio problema (40% menos aporte de agua en 1990 respecto a 1950 en las cuencas de México) (Decroix et al., 2004).

Por otra parte, los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas para manejar información de utilidad en la toma de decisiones sobre el uso de recursos. Éstos proporcionan un medio para generar, almacenar, analizar y visualizar datos espacialmente distribuidos, lo cual, los hace una herramienta idónea para la generación de parámetros de entrada de modelos hidrológicos (Martínez y Moreno, 2003).

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son un elemento clave en la modelación hidrológica ya que su manipulación permite generar elementos geométricos (redes de drenaje, patrones de drenaje superficial, límites de cuenca, partes bajas o puntos de salida del agua) y propiedades de las cuencas tales como tamaño, longitud y pendiente (Martínez *et al.*, 2004)

El uso de modelos hidrológicos permite la evaluación del escurrimiento por métodos indirectos basados en las características físicas de la cuenca (suelos, relieve,

cobertura vegetal), las cuales determinan la tasa y tipo de ocurrencia de los procesos hidrológicos. Entre los modelos basados en propiedades físicas y datos meteorológicos se encuentran el de balance hídrico y curva numérica. (Knight, *et al.*, 2001 y Fernández *et al.*, 1999).

El área estudio de éste trabajo es la cuenca del Río Sextín, considerando que forma parte de los escurrimientos generados por la Sierra Madre Occidental se asume que cuenta con características similares de deterioro que ésta, por tal motivo, se estimó el cambio de uso de suelo y vegetación relacionándolo con la producción de escurrimientos en el periodo de 1976 a 1993 utilizando el modelo hidológico SWAT^{®1} ligado a un SIG que permite representar con mayor detalle la variación espacial de la superficie de la tierra a través de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).

¹ Soil and Water Assessment Tool =Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua

OBJETIVOS

General

Determinar el cambio de vegetación en la cuenca del Río Sextín para establecer su relación con la producción de escurrimiento utilizando modelación hidrológica.

Específicos

- Calibrar y validar el modelo hidrológico SWAT con información hidrométrica de la cuenca de estudio.
- Determinar cantidad de agua de escurrimiento.
- Analizar el cambio de vegetación en el periodo 1976 - 1993.
- Relacionar el escurrimiento y los cambios producidos en la vegetación en éste período de tiempo.

META

- Establecer numéricamente relaciones vegetación – escurrimiento en la Cuenca del Río Sextín como un estudio preliminar para determinar el estado actual de producción de agua de la cuenca.

REVISIÓN DE LITERATURA

CONCEPTOS BÁSICOS

Cuenca

Depresión en la superficie terrestre, de forma y origen diversos. Pueden ser exorreicas (con un desagüe que permite que las aguas circulen y sean expulsadas de la cuenca) y endorreicas (sin desagüe). Independientemente de sus dimensiones y profundidad, pueden estar ocupadas por el agua (lagos, mares) Hay cuencas originadas por la erosión, entre las que se reconocen: a) glaciáricas, b) eólicas, c) erosivo-fluviales, d) gravitacionales, e) kársticas, f) de sufosión, g) termokásticas, h) nivales (Lugo, 1989). Además una unidad natural tridimensional con interfaces con la atmósfera y el subsuelo en función de la altura y profundidad que alcance su vegetación (Black, 1997).

Cuenca hidrológica

Es una porción de tierra firme con un sistema centrípeto de laderas y corrientes fluviales. Está delimitada por divisorias desde las cuales escurren aguas superficiales o subterráneas hacia un río principal. La cabecera de una cuenca hidrológica montañosa presenta un canal afluentes pequeños (Lugo, 1989).

Llerena (2003), define a la cuenca como unidad territorial, a partir de esta apreciación se puede comprender que únicamente en la cuenca hidrológica es posible realizar balances hídricos. Es decir, cuantificar la oferta de agua que produce la cuenca durante el ciclo hidrológico. Es por sus cualidades la unidad hidrológica y el medio

colector-almacenador-integrador de los procesos naturales y antrópicos que ocurren en la cuenca.

Balance hídrico

El ciclo hidrológico es el movimiento general del agua en nuestro planeta, ascendente por evaporación y descendente primero por precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea (Chow *et al.*, 1988). En el éste debe existir, de acuerdo al principio de conservación de masa, un equilibrio entre entradas, salidas y variaciones del sistema. Las relaciones cuantitativas que se establecen para representar a este equilibrio, constituyen los balances hídricos o hidrológicos (Pariani, 2005).

Se cuantifica dentro de una cuenca hidrológica mediante la siguiente ecuación:

$$P = Q + ET$$

P = Precipitación

Q = Caudal ($Q = E_s + E_{ss} + E_{st}$)

E_s = Escurrimiento superficial

E_{ss} = Escurrimiento subsuperficial

E_{st} = Escurrimiento subterráneo

ET = Evapotranspiración ($ET = E + T$)

E = Evaporación = $E_{suelo} + E_{follaje}$ (intercepción)

T = Transpiración

Esta ecuación es utilizada con fines prácticos, para cuantificar volumen de escurrimiento, debido a que existen cuencas que responden a diferentes fuentes de abastecimiento de recursos hídricos (Llerena, 2003).

Modelo Digital de Elevación

El nombre MDE implica una representación de las elevaciones del terreno mediante valores numéricos, generalmente esta representación es una forma simplificada de la geometría de la superficie del terreno. Es un grupo de valores que representa puntos sobre la superficie del terreno cuya ubicación geográfica está definida por coordenadas "X" y "Y" a las que se les agrega un valor de "Z" que corresponde a la elevación. Se ha convenido que los puntos deben estar espaciados y distribuidos de modo regular, de acuerdo con un patrón que corresponde a una cuadrícula (<http://www.inegi.gob.mx>).

Los valores de elevación pueden ser manejados digitalmente y desplegados en un monitor como una "malla" (o como un conjunto de "celdas"), a la que se asocian los valores de altura a cada una de las intersecciones de líneas de la "malla". Para este caso, la presentación visual es una vista isométrica (Figura 1).

Para el caso de que a las "celdas" de una cuadrícula "raster" se le asignen los valores correspondientes a los intervalos de alturas diferenciados por gamas (vista hipsométrica, ya sea de tonos de gris o de colores, la presentación gráfica puede ser en dos o tres dimensiones (Figura 1).

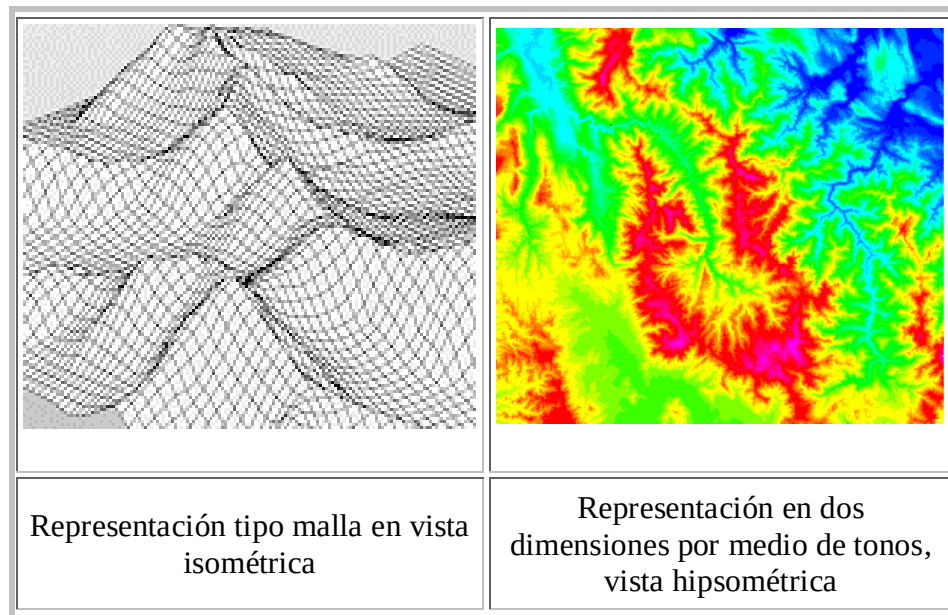


Figura 1. Representación isométrica y bidimensional del MDE.

MODELOS HIDROLÓGICOS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los SIG son una sistema para el manejo, manipulación y análisis de datos espaciales; se emplean para generar información que es de utilidad en la toma de decisiones, principalmente en el área del manejo de los recursos naturales. Una característica clave de los sistemas de información geográfica es la relación entre las características geográficas representadas sobre un mapa y los datos de los atributos que describen esa característica; normalmente se distinguen de otros sistemas que manejan datos espaciales, como el diseño asistido por computadora (CAD siglas en ingles), por su capacidad para realizar operaciones y análisis espaciales complejos (Theobald, 2000).

Los SIG's y la Hidrología se basan en principios fundamentales muy diferentes; sin embargo, existe un vínculo entre los dos. Los SIG's describen el medio ambiente, mientras la Hidrología describe cómo el ambiente afecta el flujo de agua del ciclo

hidrológico. Un objetivo fundamental en la Hidrología Espacial es el uso de los datos espaciales y funciones de los SIG's, a fin de ayudar a generar nuevas ideas y estrategias para solucionar problemas dentro de la Hidrología (Murillo, 2002).

Modelos Hidrológicos

La historia de los modelos hidrológicos se remonta a la mitad del siglo XIX, cuando en el año 1856 se describe la Ley de Darcy (la ecuación fundamental para el flujo de aguas subterráneas), y en 1871 la Ecuación de St. Venant que describe el flujo no estable de canal abierto. Durante el siglo pasado (en la década de los 40's) se comenzó a hablar del transporte de constituyentes en aguas naturales. Los modelos matemáticos manejados en computadoras empezaron a aparecer a mediados de 1960, primero para aguas superficiales y transportes de sedimentos. El Modelo de Cuencas de Standford, de Crawford y Linsley (1966), representaba la respuesta de una cuenca en su totalidad sin tomar en cuenta la caracterización de la variabilidad espacial del lugar; además utilizaba parámetros que no se relacionaban a características superficiales físicamente observables, y esto hizo que la estimación de los parámetros consumiera mucho tiempo. La precipitación se representaba como el promedio espacial de las estaciones climatológicas (Storck, *et al.* 2000). El modelo anterior se sigue utilizando en Estados Unidos; por ejemplo, en el Sistema de Predicción Ripario del Servicio Meteorológico Nacional, en el Modelo de Cuantificación de la Humedad del Suelo de Sacramento (Burnash *et al.*, 1973), que es un derivado del Modelo de Cuencas de Standford. Posteriormente, en los 70's, se desarrollaron modelos para calidad de aguas superficiales y subterráneas, y en 1980 para transporte de aguas subterráneas.

En los últimos 10 años se ha visto el desarrollo de una segunda generación de Modelos de Simulación Hidrológicos que permiten representar la variabilidad espacial de la mayoría de las características superficiales de la Tierra. Dos factores han provocado lo anterior: primero, la topografía digital y datos superficiales que están más disponibles (precipitación, temperatura, radicación, velocidad del viento), así como información digital de suelos y vegetación, aunque la precisión de éstos últimos varía. El trabajo presentado por Hutchinson (1989) habla sobre el análisis de las cuencas basados en datos topográficos mediante MDE's presentando un algoritmo de interpolación que produce MDE's mas exactos. Otros autores como Maidment (1994) y Storck *et al.* (2000) han desarrollado procedimientos para delinear la red hidrológica y cuencas a partir de los MDE's, así como la corrección de depresiones producidas por datos erróneos. Sus aplicaciones son en áreas como predicción de inundaciones (diseño y planeación), así como la construcción de registros de avenidas.

Rinaldo *et al.* (1992) analizan las similitudes entre las redes hidrológicas derivadas de los MDE's y las redes de canales óptimos (OCN) obtenidos minimizando la energía utilizada en el sistema. Moore y Grayson (1991) subdividen la cuenca en subcuencas para modelos donde el área es muy grande y el manejo de datos se dificulta.

La sensibilidad de los resultados del modelo a la resolución espacial de los datos es mencionada por Vieux (1993), que discute cómo el tamaño de la celda (o píxel) del MDE afecta la pendiente del terreno y la longitud del recorrido del fluido, y por lo tanto el escurrimiento. Vieux y Needham (1993) concluyen que a medida que se incrementa el tamaño de la célula se acorta la longitud de los cuerpos de agua y se incrementa el área de sedimentos.

Modelación de Cuencas

Los modelos de cuencas tienen cinco componentes básicos: procesos (hidrológicos) y características de la cuenca; datos de entrada; ecuaciones determinadas; condiciones iniciales y límites; y salidas. A pesar de su estructura general uniforme, varios tratamientos de los cinco componentes del modelo han resultado en un rango significativo de tipos de modelos disponibles (Singh, 1995).

Los modelos de cuencas generalmente son clasificados según el método que usan para describir los procesos hidrológicos, las escalas espaciales y temporales para las cuales son diseñados, y cualquier condición específica o uso proyectado para el cual son diseñados. El conocimiento de estos componentes es altamente recomendado cuando se selecciona la combinación que mejor se adapta a una cuenca específica y la tarea a realizar (Semmens *et al.*, 2004).

Descripción de Proceso

Los modelos de cuencas pueden ser divididos en dos tipos principales según como ellos tratan el componente espacial de hidrología de la cuenca. Modelos concretos o modelos de parámetros concretos tratan una cuenca entera como una unidad y no consideran la variabilidad espacial en los procesos, entradas, condiciones límites, o las propiedades hidrológicas de la cuenca. En contraste los modelos distribuidos representan o explican toda la variabilidad espacial en la cuenca, solucionando las ecuaciones gobernantes para cada pixel en una rejilla. En realidad, ninguno de estos extremos es conveniente para el modelado de la cuenca porque un marco concreto es una sobresimplificación y un marco distribuido requiere de cantidades considerables de los datos que no son fáciles de conseguir. Por consiguiente la mayoría de los modelos han

combinado los aspectos de ambos accesos y subdividen las cuencas en elementos más pequeños con las propiedades hidrológicas similares que pueden ser descritas por parámetros concretos. Este tipo de modelo comúnmente es mencionado como parcialmente distribuido, o casi distribuido (Semmens *et al.*, 2004).

La descripción de los procesos hidrológicos dentro de un modelo de cuenca puede ser determinístico, estocástico, o una combinación de los dos. Modelos deterministas son modelos en los cuales ninguna de las variables aleatorias son usadas, es decir, para cada juego único de datos de entrada el modelo calculará resultados fijos, repetibles (Law y Kelton, 1982). Las ecuaciones gobernantes que describen la hidrología y los procesos de erosión en un modelo determinista deben ser un factor principal en la selección de un modelo. La mayoría de los modelos de cuenca son deterministas, incluyendo tanto KINEROS como SWAT (Singh, 1995).

Los modelos estocásticos, por el contrario usan distribuciones para cada variable para generar valores aleatorios para la entrada del modelo (Clarke, 1998). Por consiguiente, la salida de un modelo estocástico es aleatoria, con su propia distribución, y así puede ser presentada como una gama de valores con límites de confianza.

La generación estocástica de variables de entrada, sin embargo, comúnmente es usada para optimizar o determinar la sensibilidad del modelo frente a diferentes variables de entrada. Si un modelo es descrito según las leyes de probabilidad entonces es mencionado como semi estocástico (Singh, 1995)

Escala espacial

Una cuenca puede extenderse desde proporciones pequeñas como una hectárea hasta unos cientos de miles de kilómetros cuadrados. La escala espacial para la cual un

modelo es diseñado es significativa para procesos específicos. El escurrimiento en cuencas grandes ($> 1000 \text{ km}^2$), por ejemplo, es dominado por el almacenamiento del cauce. En contraste el escurrimiento para cuencas pequeñas ($<100 \text{ km}^2$) es dominado por el flujo superficial. Para cuencas intermedias es importante representar el concepto esencial de homogeneidad y promedio del proceso hidrológico en los modelos. (Semmens *et al.*, 2004).

La escala espacial es un criterio importante en la selección de un modelo por las características del almacenamiento, grandes cuencas tienen bien desarrollados sus redes de drenaje, y es dominante el almacenamiento de cauce ya que son menos sensibles a lluvias de torrenciales y efímeras. De manera contraria, pequeñas cuencas son dominadas por la fase del suelo y flujo superficial, tienen la fase del cauce menos visible, y son sensibles a precipitaciones torrenciales y efímeras (*op. cit.*).

Escala de tiempo

Se considera escala de tiempo el periodo de toma de datos necesario para la explicación de un proceso. Dependiendo del proceso la escala de tiempo puede ser considerada: por hora, diaria, semanal, mensual, etc., dependiendo del proceso en estudio (Kalma y Sivapalan, 1995)

Los procesos hidrológicos pueden ocurrir a escalas de tiempos diferentes, por lo tanto es importante considerar a modelos que operen en eventos periódicos a escalas de tiempos desde diarias hasta anuales (Dooge, 1982 y Semmens *et al.*, 2004).

Uso de Suelo

Muchos estudios han mostrado que el uso de suelo dentro de una cuenca puede representar la mayor parte de la variabilidad en la calidad del flujo de agua (Omernick, 1987; Hunsaker *et al.*, 1992; Charbonneau y Kondolf, 1993; Roth *et al.*, 1996). La agricultura sobre pendientes mayores del tres por ciento, por ejemplo, aumenta el riesgo de erosión (Wischmeier y Smith 1978). Un cambio drástico de la cubierta de vegetación, como el aclareo en el noroeste Pacífico, puede producir el 90 % más de escurrimiento que en cuencas inalteradas por “prácticas humanas” (Franklin, 1992). El acoplamiento que existe entre áreas ribereñas intactas y la calidad de agua está bien establecido (Karr y Schlosser, 1978; Lowrance *et al.*, 1984). Por ejemplo, hábitats vegetales ribereños funcionan como "esponjas", reduciendo el escurrimiento de nutrientes y sedimento hacia los cauces (Peterjohn y Correll, 1984).

El porcentaje cobertura natural y lugar en donde se localiza la unidad de suelo influyen la cantidad de energía que es necesaria para mover el agua y materiales (Hunsaker y Levine, 1995). Cuencas boscosas dispersan energía asociada con precipitación (golpe de gota de lluvia), mientras que en cuencas con suelo desnudo y cobertura antropogénica (ciudades) es menos posible hacer dicha dispersión (Franklin, 1992), por lo tanto, el porcentaje de la superficie de la cuenca que es impermeable, debido a superficies urbanas y caminos, influencia el volumen de agua que fluye e incrementa la cantidad de sedimentos que pueden ser movidos (Arnold y Gibbons, 1996).

Sin embargo, precipitaciones intensas pueden exceder el umbral de energía y mover grandes cantidades de sedimentos a lo largo de una cuenca degradada (Junk *et al.*,

1989; Sparks, 1995). Es durante estos eventos que los cambios de paisaje inducidos por el hombre pueden manifestar sus aspectos negativos.

La vegetación juega un papel central en la determinación de la cantidad y momento de escurrimiento, la cual en última instancia suministra la masa y energía para la operación de procesos hidrológicos y erosivos. La mayor parte de los análisis que evalúan la variabilidad de producción de sedimento demuestran que en la parte inferior de la escala de precipitación (condiciones semiáridas), cambios pequeños en la precipitación anual causan cambios mayores en comunidades de vegetación y son asociados a producciones de sedimento (Graf, 1988).

Los métodos para transformar características de suelo y uso de suelo en parámetros distribuidos de modelos hidrológicos están adaptados para condiciones específicas. El método de número de curva (Chow *et al.*, 1988) y el USLE o método RUSLE para predecir erosión (Renard *et al.*, 1997) son los ejemplos de este tipo de acercamiento para relacionar suelo / uso de suelo en el empleo de parámetros de modelos hidrológicos, debido a que mediante parámetros basados en las características de suelo se correlaciona éstos con las características del suelo para el transporte y/o asimilación del agua de esorrentía.

Efectos de agregación de atributos de paisaje sobre la respuesta de cuencas.

Roth *et al.* (1996) y Weller *et al.* (1996) sugieren que la importancia de los rasgos del paisaje pueden cambiar en diferentes condiciones ambientales, o moviéndose de una escala espacial a otra. Por lo tanto, los métodos para analizar e interpretar la amplia gama de escalas espaciales se hacen cada vez más importantes para estudios hidrológicos y ecológicos. Los parámetros y procesos importantes en una escala espacial

no son con frecuencia importantes o predictivos en otra escala (Meentemeyer y Box, 1987).

Wood *et al.* (1988) realizaron un experimento de promedios empíricos para evaluar el efecto de la escala. Hicieron un promedio del escurrimiento sobre pequeñas cuencas, agregándose éstas dentro de cuencas más grandes, y repitiendo el proceso de promediar. Trazando la media del escurrimiento de la cuenca contra la media de área de la cuenca pequeña, notaron que la varianza disminuyó hasta que fuera insignificante en una escala de cuenca de aproximadamente 1 km². Éste análisis ha sido repetido con el radio de escurrimiento de 1 km² (Wood, 1994) y agregando la evaporación (Famiglietti y Wood, 1995) usando datos del arroyo Kings en California, siendo esto parte del experimento PÍFANO'87. Los resultados del experimento muestran que en escalas pequeñas hay extensa variabilidad en escurrimiento y en evaporación. Esta variabilidad parece ser controlada por la heterogeneidad en suelo y topografía cuya correlación en escalas de longitud está del orden de 10² – 10³ m. En una escala espacial aumentada, el aumento de pendientes conduce a una disminución en la respuesta de la cuenca. En algunas escalas, la variación alcanza un mínimo.

Influencia de la vegetación sobre el escurrimiento

La vegetación, principalmente los bosques, modifican el escurrimiento disminuyendo las aportaciones superficiales y aumentando las subterráneas, para conseguir los siguientes efectos (TRAGSATEC, 1998):

- a) La mayor capacidad de infiltración de los suelos.
- b) La intercepción de la precipitación, que disminuye la intensidad del golpeo de agua y distribuye el agua en mayor tiempo

- c) La mayor rugosidad de la superficie, los obstáculos del contorno, producen una disminución de la velocidad de desplazamiento de las aguas superficiales, disminuyendo el caudal punta de la descarga y su volumen, por la mayor posibilidad de infiltración y evaporación que supone este retraso.
- d) La transpiración de las plantas, que regula la dosis de humedad del suelo.
- e) La capacidad de retención de agua de las cubiertas con restos vegetales y húmicas (propias de las masas forestales), que incrementan el encharcamiento y retrasan el flujo superficial.

Viramontes y Decroix (2001), consideran a la Cuenca Alta del Nazas como la fuente de agua de la Región Hidrológica 36, y enfatizan que la modificación de las condiciones del escurrimiento puede provocar graves problemas en el desarrollo. A nivel local, esto representa un aumento de crecidas y de estiajes, así como por una disminución de la capacidad productiva de los bosques y los pastizales. A nivel regional, los cambios del régimen hídrico se podrían observar por un aumento del transporte sólido y un crecimiento de las irregularidades interanuales de los escurrimientos.

Cobertura Vegetal y Uso de Modelos de Simulación

Ollinger *et al.*, (1997), usaron el modelo PnET-II para estimar la productividad forestal regional y el escurrimiento para el Noreste de Estados Unidos. El modelo fue utilizado bajo un SIG con el apoyo de bases de datos climáticas y mapas de cobertura de suelo para determinar los efectos de factores como la contaminación del aire y el cambio climático, y de esta manera resolver la problemática del ecosistema regional respecto a la producción de agua por lo bosques.

Rincón (1999), estudió el impacto de la deforestación en bosques tropicales en la Reserva Biológica el Tambito en la cordillera Occidental Cauca – Colombia, utilizando un modelo hidrológico dinámico superficial operando sobre SIG, incluyendo la simulación de radiación solar, balance energético, evaporación, interceptación y precipitación real, infiltración, balance hídrico del suelo, escurrimiento y flujo superficial, recarga y erosión. En dichos bosques, una de las principales causas en el cambio de uso del suelo, y objetivo de este estudio, es la presión que ejerce el hombre sobre éstos.

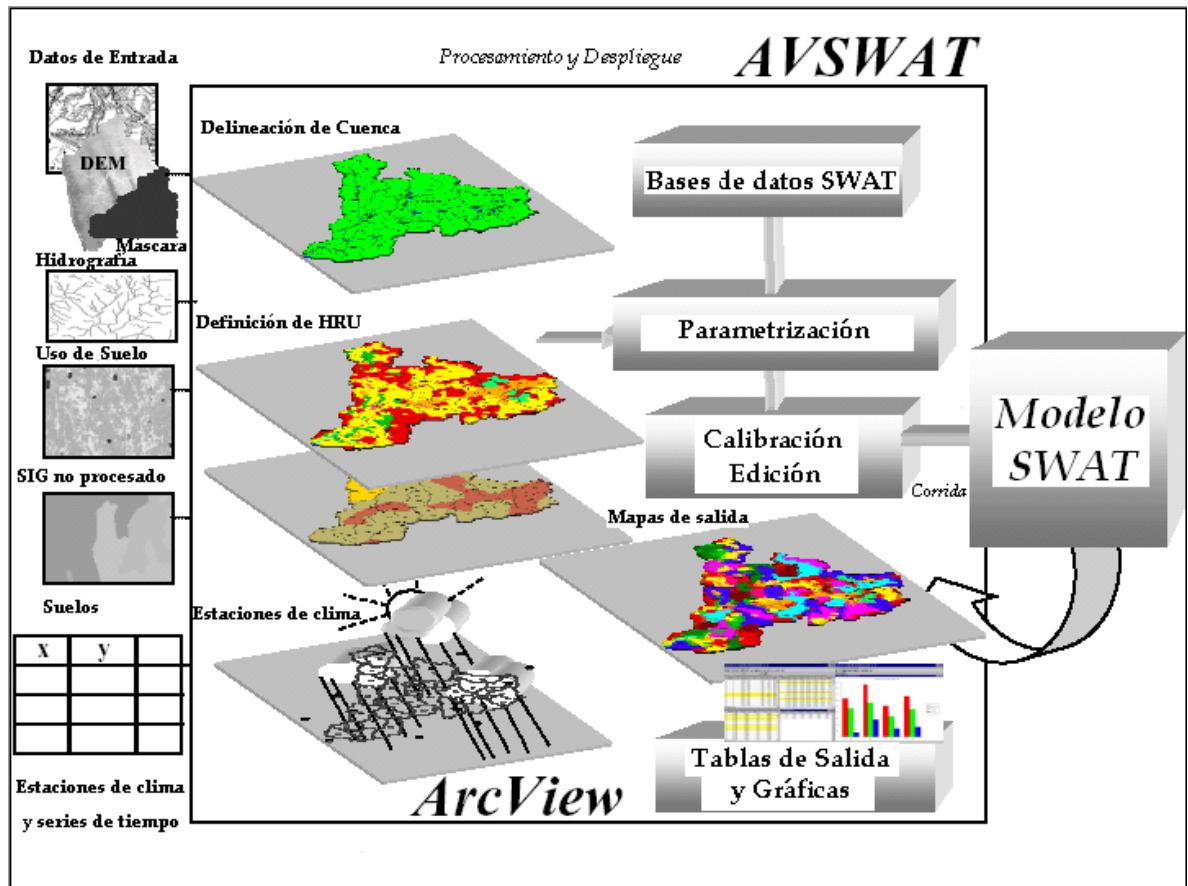
En estudios realizados por Sun *et al.*, (2003) sobre producción de agua relacionado a la estructura del bosque en el sureste de Estados Unidos usando el modelo de AET (Evaporación Anual Actual) en un escenario de Cambio Climático para determinar el rendimiento anual de agua en base a aprovechamientos forestales y cambio de uso de suelo. Se evaluaron también los efectos combinados, impacto de prácticas silvícolas, efectos del cambio climático, evapotranspiración y calidad y cantidad de agua. Los resultados de esta modelación explican la variabilidad espacial de producción de agua a través de la región sureste de Estados Unidos, además de la respuesta de rendimiento de agua por remoción forestal es muy diversa dependiendo principalmente del gradiente fisiográfico y el tipo de vegetación.

Keppeler *et al.*, (2003), encontraron que el aprovechamiento forestal y la construcción de caminos afectan el escurrimiento, la producción de sedimentos y la erosión analizando la información generada por la Cuenca Experimental Caspar Creek establecida en 1962 para investigar los efectos del manejo forestal en el escurrimiento, sedimentación y erosión en cuencas boscosas de la Costa Norte de California.

Vahos (2003) utilizó el modelo SWAT en la subcuenca del Río Claro en Colombia analizando el balance hidrológico de la cuenca en un periodo de 20 años y la

pérdida de suelo en Tha^{-1} , así como también la producción de sedimentos, obteniendo resultados satisfactorios del uso del modelo por la facilidad de su manejo, además de ser un modelo producto de años de investigación y respaldo que comprueban su robustez, ya que posibilita el trabajo en áreas de gran tamaño con un análisis detallado del comportamiento de la cuenca y sus subdrenajes en periodos largos de tiempo. En este trabajo se contrastaron los datos generados de un escenario real, con dos supuestos analizándose el comportamiento del balance y la producción de sedimentos entre ellos.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT



Fuente: Di Luzio, *et al.* 2002

Figura 2. Esquema de procesamiento de información del modelo SWAT

SWAT es un modelo hidrológico de simulación generado por ARS (Agricultural Research Service²) en los Estados Unidos (Neitsch *et al.*, 2002).

El modelo esta: a) explica bases físicas, b) usa datos de entrada fácilmente disponibles, c) opera computacionalmente hasta grandes cuencas, d) es capaz de simular grandes periodos para manejar los efectos en los cambios de uso.

² Servicio de Investigación en Agricultura

El SWAT, divide las cuencas hidrográficas en pequeñas cuencas, al hacer esto es posible calcular con mayor precisión los caudales y los sedimentos presentes. Además para hacer más fáciles y exactos los cálculos, el SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU), los cuales resultan del cruce de información de tipos de suelo con las diferentes capas.

El modelo SWAT tiene una resolución en base diaria y por ser un modelo de tipo continuo permite simulaciones a largo plazo (años). Lo anterior le da la ventaja de comparar el efecto de diferentes sistemas de manejo de la producción de agua y sedimentos, así como en la carga de contaminantes a las fuentes de agua superficial.

La información de entrada requerida por el programa para cada cuenca es agrupada y organizada dentro de las siguientes categorías: topografía de la cuenca, suelos, uso de suelo, precipitación, clima (temperatura, viento, radiación solar), lagunas o reservorios y aguas subterráneas.

Variables a calcular por el modelo

➤ Balance Hídrico

El programa se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca el cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \dots\dots\dots(1)$$

Donde SW_t es el contenido de agua en el suelo en el día t, SW es el agua aprovechable por las plantas, t es el tiempo en días, R es la precipitación diaria, Q la cantidad de

escorrentía diaria, ET la evapotranspiración diaria, P la percolación diaria y QR el flujo de retorno o flujo base; todas las unidades en mm.

➤ **Escurrimiento superficial**

Es el agua superficial que fluye sobre la superficie terrestre y tiene relación directa con el almacenamiento de la humedad del suelo y el flujo subsuperficial (infiltración, flujo de aguas subterráneas) dentro del contexto de balance hídrico. Su cálculo afecta la cantidad de agua total expresada en el balance hídrico.

La cantidad de escorrentía (Q) es estimada por medio de la metodología del número de curva establecida por el Servicio de Conservación de Suelos de los E. U., con datos de lluvia diarios. Q es el escurrimiento diario, que esta determinado en el suelo, la cobertura del suelo y la práctica de manejo que en este se realice.

$$Q = \frac{(R - 0.2s)^2}{(R + 0.8s)} \quad R > 0.2s \dots\dots\dots(2)$$

$$Q = 0.0 \quad R \leq 0.2s$$

Donde Q es el escurrimiento diario, R es la lluvia diaria, y s es el parámetro de retención, este parámetro esta relacionado con el número de curva (CN).

$$s = 254 \left(\left(\frac{100}{CN} \right) - 1 \right) \dots\dots\dots(3)$$

La constante, 254 arroja s en mm. Así, R y Q también son expresados en mm. SWAT hace correcciones para CN por pendiente, debido a que este esta descrito para 7% de pendiente.

➤ **Infiltración**

La infiltración es un proceso en el cual el agua penetra desde la superficie del suelo. Algunos de los factores que intervienen y afectan este fenómeno son la cobertura vegetal, la porosidad y la conductividad hidráulica así como el contenido de humedad del suelo, de ahí su importancia en el balance hídrico, ya que la infiltración se puede considerar de esta forma como una de las pérdidas en dicho balance.

➤ **Flujo lateral o subsuperficial**

El flujo lateral es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye subsuperficialmente y alimenta los canales de drenaje, quebradas y ríos. El flujo subsuperficial es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre 0 – 2 m mediante un modelo de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de conservación de masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control:

$$\frac{S_2 - S_1}{t_2 - t_1} = i * L - \left(\frac{q_{lat1} + q_{lat2}}{2} \right) \dots \dots \dots (4)$$

Donde S es el volumen drenable de agua almacenada en la zona de saturación en mm^{-1} (mayor de capacidad de campo), t es el tiempo en horas, q_{lat} es el flujo lateral en m^3h^{-1} , i es la tasa de agua que entra en la zona de saturación en $\text{m}^2 \text{h}^{-2}$, L es la longitud de la pendiente de la cuesta en m y los sufijos 1 y 2 se refieren al comienzo y final del intervalo.

➤ Percolación

El agua de percolación es la fracción del agua infiltrada que logra atravesar la zona radical, la cual SWAT considera entre 0 – 2 m. Esta agua de percolación puede llegar hasta los canales de drenaje (flujo de retorno) o percolarse hasta los acuíferos profundos a mas de 25 m.

El componente percolación de SWAT usa una técnica de almacenamiento combinado para predecir el flujo medio de cada capa de suelo. Una vez que el agua es percolada al acuífero profundo, esta no puede alimentar el escurrimiento. La técnica de almacenamiento esta basada en la siguiente ecuación:

$$SW_t = SW_0 \exp(-\Delta t / TT_t) \dots\dots\dots(5)$$

$$TT_t = (SW_t - FC_t) / H_t \dots\dots\dots(6)$$

Donde SW_0 y SW_t son los componentes del agua del suelo en el comienzo y final del día en mm, Δt es el intervalo de tiempo en 24h y TT_t es el tiempo de viaje a través de la capa del suelo t en h, H_t es la conductividad hidráulica mm h^{-1} , FC_t es el contenido de agua a capacidad de campo para cada capa, en mm. Así, la percolación puede ser calculada por sustitución de SW_t desde SW_0 .

$$O_t = SW_0 * (1 - \exp(-\Delta t / TT_t)) \dots\dots\dots(7)$$

Donde O_t es la tasa de percolación en mm d^{-1} .

➤ Flujo de retorno

Es el agua que llega hasta el cauce de los canales naturales desde las aguas subterráneas, este flujo es el que mantiene agua en los ríos y quebradas en las épocas de baja precipitación.

$$q_t = q_{t-1} * e^{-\alpha \Delta t} + Rc * (1 - e^{-\alpha \Delta t}) \dots\dots\dots(8)$$

Donde q_t es el flujo de retorno en el día t , α es la constante de proporcionalidad, Rc es la recarga del acuífero superficial. Esta ecuación esta sustentada en que la variación del flujo de retorno con el tiempo esta también relacionada linealmente con la recarga del acuífero.

➤ Evapotranspiración

La evapotranspiración es el agua que sale del suelo hacia la atmósfera por transpiración de las plantas y por evaporación del suelo.

El modelo SWAT ofrece tres métodos para estimación de la evapotranspiración potencial: Monteith (1965), Hargreaves and Sammani (1985) y Priestley-Taylor (1972).

El método de Penman-Monteith: este método fue recientemente añadido al SWAT para suministrar un medio de estimación de efectos a cambios de CO₂. Las ecuaciones del método son:

$$E_0 = \frac{\delta(h_0 - G) + 86.7 AD * (e_a - e_d) AR}{(HV) * (\delta + \gamma)} \dots\dots\dots(9)$$

y

$$E_p = \frac{\delta(h_0 - G) + 86.7AD*(e_a - e_d)AR}{HV*\left(\delta + \gamma*\left(1 + \left(\frac{CR}{AR}\right)\right)\right)} \dots\dots\dots(10)$$

Donde h_0 es la relación neta (MJ m^{-2}), δ es la pendiente de la curva de presión de vapor saturado ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$), G es el calor del suelo (MJ m^{-2}), e_a es la presión de vapor saturado en la temperatura media del aire (kPa), e_d es la presión de vapor en la temperatura media del aire (kPa), HV es el calor latente de vaporización y γ es una constante psicrométrica ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$), y AD es la densidad del aire en g m^{-3} , AR es la resistencia aerodinámica para el calor y la transferencia de vapor en s m^{-1} , y CR es la resistencia dosel para la transferencia de vapor en s m^{-1} .

Método Hargreaves and Sammani. Este método estima la evapotranspiración potencial como una función de radiación y la temperatura del aire. El método de Hargreaves fue modificado para uso en SWAT por incremento en el exponente diferencial de la temperatura desde 0.5 a 0.6. También, la radiación terrestre es reemplazada por RAMX (radiación solar máxima posible en la superficie del suelo) y el coeficiente es ajustado desde 0.0023 a 0.0032 para propósitos de conversión. La ecuación modificada es:

$$E_0 = 0.0032\left(\frac{RAMX}{HV}\right)(T + 17.8)(T_{mx} - T_{mn})^{0.6} \dots\dots\dots(11)$$

$$HV = 2.50 - 0.0022T \dots\dots\dots(12)$$

Donde T_{mx} y T_{mn} son las temperaturas del aire máximas y mínimas diarias en $^\circ\text{C}$, HV es el calor latente de vaporización y T es la temperatura media del aire diaria.

El método de Priestley-Taylor: Calcula la ecuación:

$$\lambda E_0 = \alpha_{pet} * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * (H_{net} - G) \dots\dots\dots(13)$$

Donde λ es el calor latente de vaporización (MJ kg⁻¹), E_0 es el potencial de evapotranspiración (mm d⁻¹), α_{pet} es un coeficiente, Δ es la pendiente de la curva de saturación de vapor (kPa °C⁻¹), γ es la constante psicrométrica (kPa °C⁻¹), H_{net} es la radiación neta (MJ m⁻² d⁻¹), y G es el flujo de densidad de calor en el suelo (MJ m⁻² d⁻¹).

➤ Variables climáticas

Las variables climáticas para el SWAT son precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si la precipitación y la temperatura diaria están disponibles, pueden ser entonces ingresadas directamente al modelo.

➤ Sedimentación

Los sólidos perdidos o sedimentados son el suelo que se pierde por acción de la erosión hídrica, el suelo es desprendido por el golpe directo de las gotas de lluvia y por la fricción del agua de esorrentía. El suelo desprendido es transportado por los flujos superficiales hasta los canales de drenaje, por los cuales es sacado de la cuenca o depósitos del cauce.

La producción de sedimentos es calculada por cada HRU con la ecuación modificada de la pérdida universal de suelo. (MUSLE)

$$y = 11.8(V * q_p)^{0.56} K * C * PE * LS \dots\dots\dots(14)$$

Donde y es la producción de sedimentos desde la subcuenca en t, V es el volumen de escurrimiento superficial para la subcuenca en m^3 , q_p es la tasa de flujo pico en $m^3 s^{-1}$, K es el factor de erodabilidad del suelo, C es el factor de manejo, PE es el factor de la práctica de control de erosión, y LS es el factor longitud y pendiente de inclinación.

A la ecuación anterior de la MUSLE, Williams (1995) le hace una pequeña variación para trabajar en el modelo, luego así la ecuación queda:

$$Sed = 11.8 * (Q_{surf} * q_{peak} * area_{hru})^{0.56} * K_{USLE} * C_{USLE} * P_{USLE} * LS_{USLE} * CFRG \dots\dots\dots(15)$$

Donde:

Sed = es el sedimento producido en un día dado en toneladas métricas

Q_{surf} = es el volumen de esorrentía superficial en $mm ha^{-1}$

q_{peak} = es la tasa de esorrentía pico en $m^3 s^{-1}$

$area_{hru}$ = es el área de la HRU en ha

K_{USLE} = es el factor K USLE de erodabilidad

C_{USLE} = es el factor C USLE de manejo de cobertura

P_{USLE} = es el factor P USLE de prácticas de manejo

LS_{USLE} = es el factor LS USLE topográfico

$CFRG$ = factor de contenido rocoso del primer horizonte del suelo

Algunos de los factores pueden ser introducidos manualmente por el usuario y las bases de datos pueden ser modificadas y actualizadas con datos propios.

Sensibilidad del rendimiento de agua y sedimentos a valores de parámetros

La simulación del rendimiento de agua y sedimentos en SWAT comprende datos de lluvia, geometría de la cuenca y parámetros hidráulicos, cuya influencia no ha sido estudiado extensamente. La capacidad actual del modelo SWAT requiere una extensa base de datos de entrada debido a la detallada caracterización hidráulica y resolución espacial de salida del modelo. Una reducción de la base de datos de entrada requiere un detallado análisis de sensibilidad de salida del modelo a variaciones de parámetros. El análisis de sensibilidad tanto por aproximaciones multivariadas como univariadas, permite a los modeladores direccionar la importancia relativa de parámetros del modelo, su actividad y la precisión de resultados de salida del modelo (Jasso, 1998).

El modelo SWAT simula las variables de producción de balance hídrico y sedimentos en base diaria sin tener en cuenta la duración de un evento de lluvia – escurrimiento. Diferentes referencias sugieren que el volumen de escurrimiento superficial como el estimado por el SWAT es muy sensible a la condición del número de curva (CN_{II}) valor II (Lane y Ferreira, 1980; Mc Cuen y Snyder, 1986). Este parámetro esta sujeto a ajustes para una pendiente de cuenca diferente al 5% y para humedad inicial del suelo en base diaria. Mientras que el primer ajuste es una transformación directa del valor de CN_{II} dada la pendiente de cuenca actual, el segundo depende de la disponibilidad restante de agua en el suelo en base diaria. Las estimaciones de la evapotranspiración potencial son relevantes en este proceso. Por lo tanto, ajustes diarios de CN_{II} depende de la capacidad de retención de agua en el suelo, temperaturas diarias, y la precipitación total ocurrida en los cinco días precedentes. Los factores anteriores

afectan la producción de agua sobre las pendientes mientras que el agua encausada hacia la salida de la cuenca incorpora la geometría del canal y propiedades hidráulicas que explican la producción total del agua (Neitsch *et al.*, 2002).

La producción de sedimentos como la estima SWAT esta basado en el volumen de escurrimiento y el escurrimiento pico como las variables impulsoras. Consecuentemente, este proceso se afecta no solo por aquellos factores considerados en la producción de agua, sino también por la pendiente y las variables del canal incluyendo estimaciones en escurrimiento pico, los factores de erosión representados en MUSLE (anteriormente descrito). Los factores para el cálculo de escurrimiento pico incluye las características geométricas de la cuenca tanto en pendiente como en canal consideradas en el tiempo de concentración (Jasso, 1998).

Los datos de textura de suelo son relevantes en la estimación de condición de erodabilidad (parámetro K) mientras que las variables de cobertura vegetal aplican en estimar el valor del factor de cobertura. El valor de pendiente y la longitud juegan un papel importante en la simulación de producción de sedimentos como variables del componente del factor *LS* en *MUSLE*. El análisis de sensibilidad reportado por Ferreira *et al.*, (1995) mostró que la producción de sedimentos estimados por el *USLE* es el mas sensible de estos factores. La producción total de sedimentos como resultados de la salida de los efectos combinados de producción de sedimentos en pendientes e incluso separación y depósito en canales. Las características morfológicas de los canales son importantes en la determinación de la importancia relativa de separación y depósito de sedimentos en arroyos (Jasso, 1998).

Calibración del Modelo

La calibración es el proceso de ajuste de valores de parámetros para optimizar el funcionamiento de parámetros de acuerdo a un grupo de criterios predefinidos. Cada modelo usa un grupo de uno o más parámetros que son usados para determinar el comportamiento básico del sistema modelado. Los valores del parámetro pueden ser directamente especificados o pueden ser estimados usando técnicas de optimización manuales o automáticas (Soorooshian y Gupta, 1995).

Para determinar cual grupo de parámetros provee el mejor resultado, debe haber una forma de valorar los resultados. En otras palabras un criterio objetivo para medir la calidad de los resultados debe ser definido. La ASCE³ (DeVantier *et al.*, 1993) reviso una variedad de medidas de “bondad” para modelos hidrológicos. Su trabajo revela que muchos artículos publicados proveen de información inadecuada sobre la calidad de predicciones de modelos. Ellos recomiendan el uso de tres medidas de bondad de ajuste para series de tiempo de predicciones de flujo.

Los tres criterios para hidrografía continua de ASCE’s son discutidos a continuación.

Desviación de volúmenes de escurrimiento (D_v)

$$Dv(\%) = \frac{V - V_s}{V} * 100 \dots\dots\dots(16)$$

Donde:

V = Volumen de escurrimiento medidos anualmente o estacionalmente

V_s = Volumen de escurrimiento modelado anualmente o estacionalmente

³ American Society of Civil Engineers = Sociedad Americana de Ingenieros Civiles

D_v puede ser cualquier valor, pudiendo ser igual a cero para un perfecto funcionamiento del modelo. Se puede notar que D_v podría ser igual a cero aún si la hidrografía simulada sostuviera un parecido nulo a la hidrografía medida. D_v es numéricamente equivalente a la diferencia de porcentaje en el flujo medio y como esta es una medida del balance hídrico del modelo.

Coeficiente de Nash – Sutcliffe (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q})^2} \dots\dots\dots(17)$$

Donde:

Q_o = volumen de escurrimiento medido anual

Q_s = volumen de escurrimiento simulado anual

$\bar{Q}$ = volumen de escurrimiento promedio anual

n = número de años

Si $R^2 = 0$, las predicciones del modelo no son mejores que si se usara el promedio anual del volumen de escurrimiento (Nash y Sutcliffe, 1970)

Coeficiente de ganancia de la media diaria (DG)

$$DG = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_i)^2} \dots\dots\dots(18)$$

Donde:

Q_o = Flujo medido diario

Q_s = Flujo modelado diario

$\bar{Q}_i$ = Flujo promedio medido en años previos para ese día

n = número de días

Este varía entre cero y uno, representando con cero un modelo perfecto. Esta medida tiende a ser influenciada por diferencias en flujos altos, haciéndola conveniente para evaluación de funcionamiento para modelos de simulación donde las inundaciones son importantes, pero menos apropiado para situaciones donde flujos bajos son los de mayor interés.

La medida primaria seleccionada para valorar el funcionamiento del modelo en este estudio será el coeficiente de eficiencia, R^2 , introducido por Nash y Sutcliffe (1970). El coeficiente de eficiencia fue seleccionado porque es adimensional y es fácil de interpretar. Si el modelo predice el escurrimiento observado con perfección, $R^2 = 1$. Si $R^2 < 0$, el poder de predicción del modelo es peor que simplemente usar el promedio de valores observados Q_o . Esta medida ha sido también usada por otros investigadores para valorar el funcionamiento de modelos de simulación continua en Walnut Gulch (Martínez, 1999, Jasso, 1998; Sasowsky y Gardner, 1991; Renard *et al.*, 1985)) y otras pequeñas cuencas experimentales (Wilcox *et al.*, 1989; Arnold y Wiliams, 1987). La comparación de resultados de este estudio con otras investigaciones se facilitará con el uso de esta medida.

Tasa de cambio de vegetación

$$t = \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \dots\dots\dots(19)$$

Donde:

t = es la tasa de cambio (para expresar en % hay que multiplicar por 100)

S_1 = superficie en la fecha 1

S_2 = superficie en la fecha 2

n = número de años entre las fechas

La tasa de cambio representa el porcentaje de modificación entre los periodos de estudio. Fue generada por FAO (1996) citado por Velásquez *et al.* (2002) y utilizada para cálculos de deforestación y expresa el cambio en porcentaje de superficie para cada año dentro del periodo de estudio.

Comportamiento de la vegetación (ecuación)

Para calcular y expresar la tasa de cambio de un periodo conforme a su pendiente para el tipo de vegetación se utilizó la siguiente fórmula generada por Instituto de Geografía de la UNAM (Velásquez *et al.*, 2002) siendo esta:

$$e = (S_{x2} - S_{x1}) / p_{x1}, p_{x2} \dots\dots\dots(20)$$

Donde:

e = estimación de tasa de cambio

S_{xt} = superficie del tipo de vegetación X (Serie I, Serie II)

X = tipo de vegetación

p = periodo transcurrido en años

$t1$ = fecha 1

$t2$ = fecha 2

Una vez obtenida la estimación se construyen las ecuaciones que describen el comportamiento probable de cada tipo de vegetación con base a su tendencia y la

superficie en cualquier fecha futura. La ecuación generada por el Instituto de Geografía de la UNAM (Velásquez *et al.*, 2002) se presenta a continuación.

$$S = e * p + S_{t_2} \dots\dots\dots(21)$$

Donde:

e = tasa de cambio de un periodo expresada en su pendiente

p = periodo transcurrido en años

S_{t_2} = superficie del tipo de vegetación en el año inicial de nuestro estudio

S = superficie estimada en el periodo de estudio

Modelo de estimación del proceso de deforestación

Este modelo fue generado el Instituto de Geografía de la UNAM (Velásquez *et al.*, 2002) en base a las coberturas dominadas por formas de vida arbórea (bosques y selvas) se agregaron y su dinámica de cambio se describió en dicho modelo. En éste se enfatiza la probabilidad de cambio de cualquiera de estas categorías hacia las cubiertas antropogénicas (Figura 3).

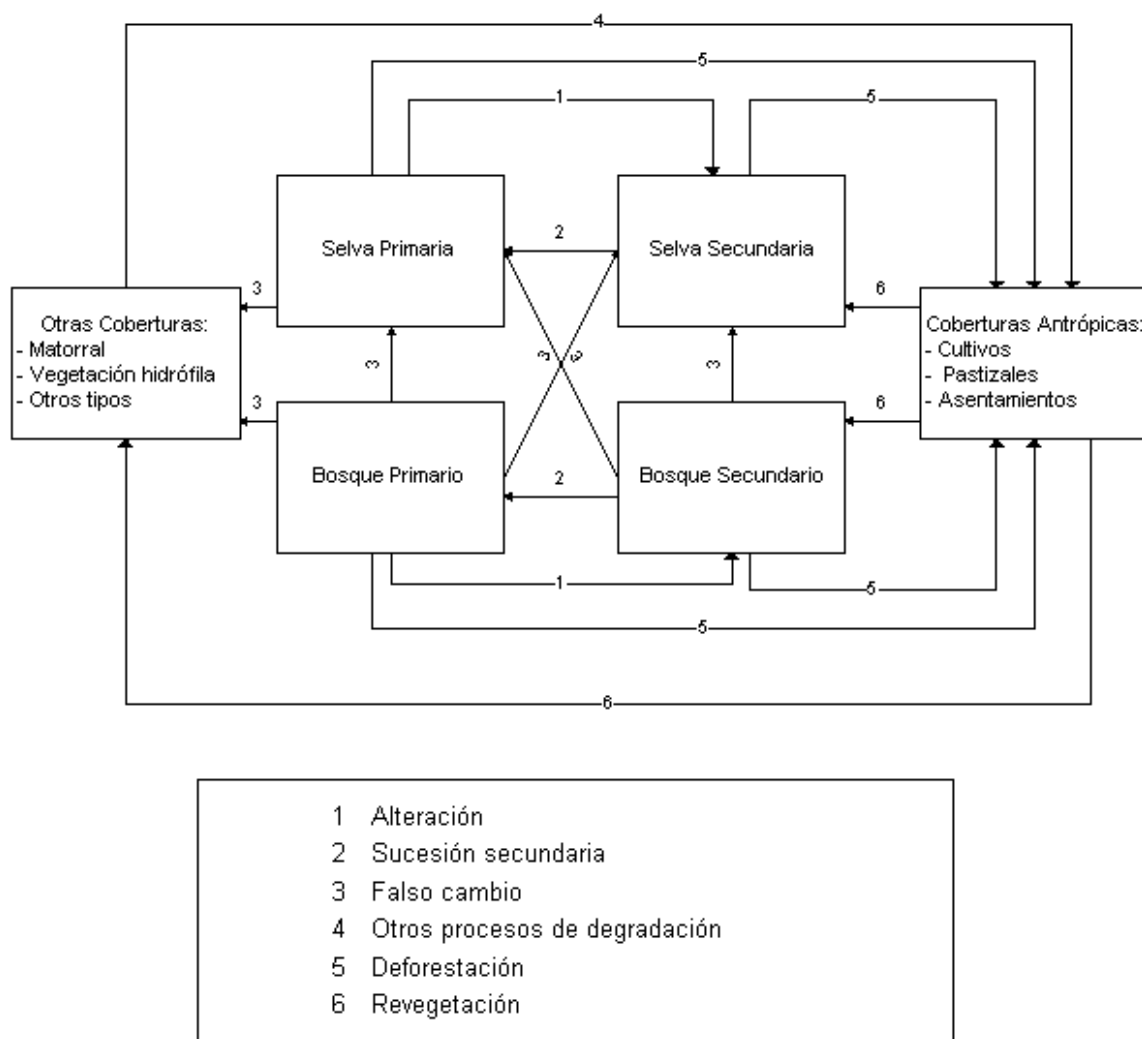


Figura 3. Modelo de procesos de deforestación. En este modelo, se consideran las categorías para resaltar las pérdidas y ganancias de las cubiertas dominadas por formas de vida arbórea (bosques y selvas), expresado en porcentaje de cambio entre el periodo de estudio.

Modelo de estimación de proceso de impacto pecuario

El Instituto de Geografía de la UNAM (Velásquez *et al.*, 2002) en su análisis detectó que buena parte de los cambios se circunscribían a identificar procesos agrícolas como los únicos directamente relacionados al cambio. La actividad pecuaria, no obstante, ha tenido y tiene un impacto considerable que hasta hoy día no se ha estimado a nivel nacional. Para detectar este impacto se conformó el siguiente modelo que agrupa las categorías que son directamente relacionadas que utilizan total o parcialmente a la

actividad pecuaria en combinación con otras actividades (colecta de leña, agricultura nómada, tala clandestina de menor escala). El modelo se muestra en la Figura 4:

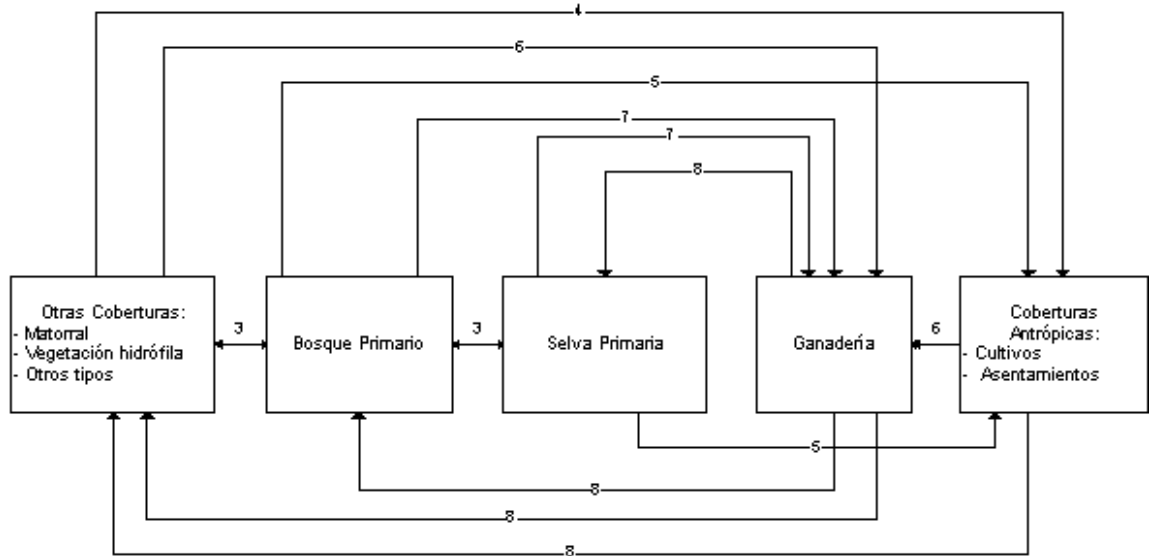


Figura 4. Principales procesos tanto por la actividad pecuaria (incluyendo las categorías de vegetación secundaria) como por la agrícola (1 = alteración; 2 = sucesión secundaria; 3 = falso cambio; 4 = procesos de degradación por cobertura antrópica; 5 = deforestación por cobertura antrópica; 6 = degradación por ganadería; 7 = deforestación por ganadería; 8 = re-vegetación).

MATERIALES Y MÉTODOS

INFORMACIÓN BÁSICA DE LA CUENCA

Localización

El Río Sextín forma parte de la Región Hidrológica No.36 (RH36), se encuentra en el estado de Durango, situado dentro de los municipios de Tepehuanes, Guanaceví, Ocampo, San Bernardo, El oro e Inde. Tiene su origen en la Sierra Madre Occidental, hacia el Oriente de las cuencas de los ríos de Balleza y Colorado, al Sur de la Sierra del Oso y al Noroeste de la sierra de la Candela. El parteaguas principal que origina esta cuenca se encuentra a elevaciones que varían entre los 2,258 msnm y los 3,315 msnm. Se ubica entre los paralelos 25° 34' y 26° 30' de latitud Norte y los meridianos 104° 57' y 106° 20' de longitud Oeste (SRH, 1970).

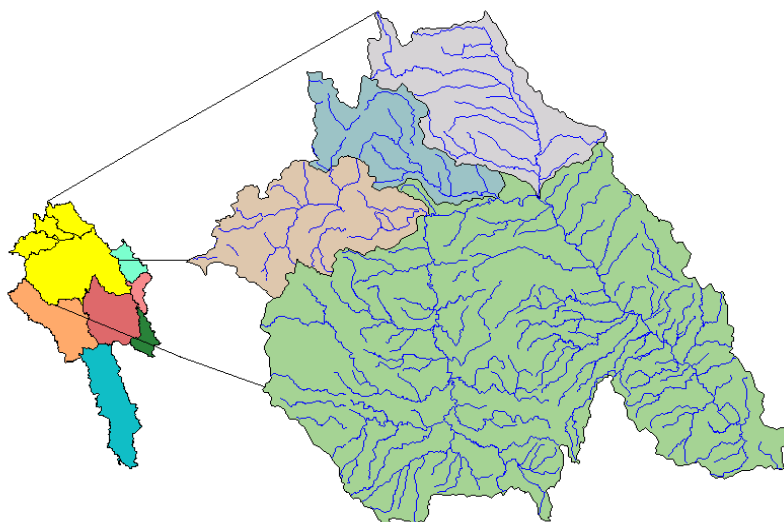


Figura 5. Localización de la Cuenca del Río Sextín dentro de la cuenca de la Presa Lázaro Cárdenas.

Fisiografía

La cuenca de estudio se sitúa en la provincia Sierra Madre Occidental, a su vez comprende la subprovincia Sierras y llanuras de Durango desde el norte hasta el sur de la cuenca, al noroeste la subprovincia Gran meseta y cañones chihuahuenses, y al suroeste la subprovincia Gran meseta y cañones duranguenses. Presenta variaciones en su relieve, siendo la topoforma predominante en la parte alta de la cuenca la meseta asociada con cañadas, y sierra alta en los cerros de mayor altitud como es el caso del cerro del Aguaje (sur de la cuenca) y la sierra del oso (noreste de la cuenca). El cause del río se presenta en valles intermontanos y abiertos de montaña, rodeados por lomeríos desde el norte hasta el sureste de la cuenca en la desembocadura con la presa “El Palmito” (SPP, 1981).

Geología

Las rocas más antiguas de la Sierra Madre Occidental pertenecen al Paleozoico, con afloramientos de esquistos y metasedimentarios; este último específicamente para el Paleozoico Superior. En las rocas pertenecientes al Triásico – Jurásico hay pequeños afloramientos de areniscas. Del Jurásico existen afloramientos de diorita, granito y areniscas. Por parte del Cretácico los afloramientos son de caliza, asociación caliza – lutita y lutita – arenisca. Procedentes del terciario encontramos afloramientos de conglomerados, diorita, granito, andesita, predominando sobre estos en superficie la asociación riolita – toba ácida y toba ácida. En la zona de estudio predominan las rocas ígneas extrusivas (más del 50%), siguiendo las sedimentarias, ígneas intrusivas y finalmente las metamórficas. Además, hay depósitos de conglomerados y rellenos aluviales del Cuaternario (INEGI, 1988).

Las principales estructuras de la Sierra Madre Occidental están constituidas por fracturas y diversas fallas de tipo normal. También existen minas de oro, plata y cobre en el área de estudio (*op. cit.*).

Clima

El territorio comprendido por la cuenca del Río Sextin presenta 7 tipos de clima. En parte oeste predominan climas desde templados subhúmedos [$C(w_1)$ y $C(w_0)$] hasta semifríos [$C(E)(w_1)$ y $C(E)(w_2)$] en las partes altas, extendiéndose, de norte a sur, una franja de climas templados. Al noroeste y sureste se presentan climas semisecos templados [$BS_1kw(w)$ y BS_1kw] y semiseco cálido [$BS_1hw(w)$] (SPP, 1980).

A continuación se presenta la descripción de los tipos de climas según Köpen modificado por García presentes en la cuenca:

$BS_1kw(w)$: semiseco templado con lluvias en verano, verano cálido y menos del 5% de precipitación invernal.

BS_1kw : semiseco templado con lluvias en verano, invierno fresco y % de precipitación invernal entre 5 y 10.2.

$BS_1hw(w)$: semiseco semicálido con lluvias en verano, invierno fresco y menos del 5% de precipitación invernal.

$C(w_1)$: templado subhúmedo con lluvias en verano y % de precipitación invernal entre 5 y 10.2.

$C(w_0)$: templado subhúmedo con lluvias en verano y % de precipitación invernal entre 5 y 10.2. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm.

$C(E)(w_1)$: semifrío subhúmedo con lluvias en verano y % de precipitación invernal entre 5 y 10.2.

C(E)(w₂): semifrío subhúmedo con lluvias en verano y % de precipitación invernal entre 5 y 10.2. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm.

Hidrología

El nacimiento de este Río ocurre en un lugar conocido como el Salitre, municipio de Guanaceví, en el estado de Durango, al oriente del Río Colorado en cuyo parteaguas, común con el Río Sextín, se tienen alturas hasta de unos 3000 msnm. Su recorrido se inicia con 45 km. en dirección sureste; en este trayecto se une al Arroyo de Escobar por la margen derecha y a partir de este punto el Río continua en dirección norte a lo largo de unos 50 km. mas de recorrido. En este nuevo tramo los principales afluentes que recibe son el Arroyo Biogamé y el Río San Esteban, por la margen izquierda. Luego vuelve a cambiar de rumbo y continua durante 33 km. hacia el este. En este tramo se le unen por la margen izquierda el Arroyo de los Lobos y el Arroyo de Matalotes, principalmente. Finalmente, toma la dirección sureste, con 118 km. de recorrido aproximado y llega a la confluencia con el Río Ramos en el embalse de la presa Lázaro Cárdenas. En este trayecto final el Río Sextín o del Oro recibe la aportación izquierda del Arroyo Grande más las de otros arroyos secundarios cuyos nombres no están bien identificados. El área de cuenca desde su origen hasta la confluencia con el Río Ramos, en el vaso de la Presa Lázaro Cárdenas es de 8,246 km² y una longitud de 245 km (SRH, 1970).

Edafología

La información fue obtenida de las cartas edafológicas digitales del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) escala 1:250,000. En estas cartas se muestran los mismos marcos de referencia que en la carta topográfica, así como otros elementos propios de ella. En todas las escalas se señala la distribución de los suelos, clasificados de acuerdo con el sistema FAO/UNESCO de 1970 modificado por la Dirección General de Geografía. En dicha clasificación se indica la textura o cantidad de arena, limo y arcilla de la parte superficial del suelo; la presencia de fases químicas como salinidad y sodicidad; y la presencia de fases físicas como roca o estratos cementados cercanos a la parte superficial del suelo o fragmentos de ellos en la superficie del mismo.

Como información adicional no representada cartográficamente, se describen las características morfológicas de los perfiles de suelo más representativos, y se dan los datos analíticos físicos y químicos de las muestras correspondientes a cada uno de los horizontes o capas de dichos perfiles (<http://www.inegi.gob.mx>).

Los tipos de suelos, en la Cuenca del Río Sextín, se representan en la Figura 6 y son:

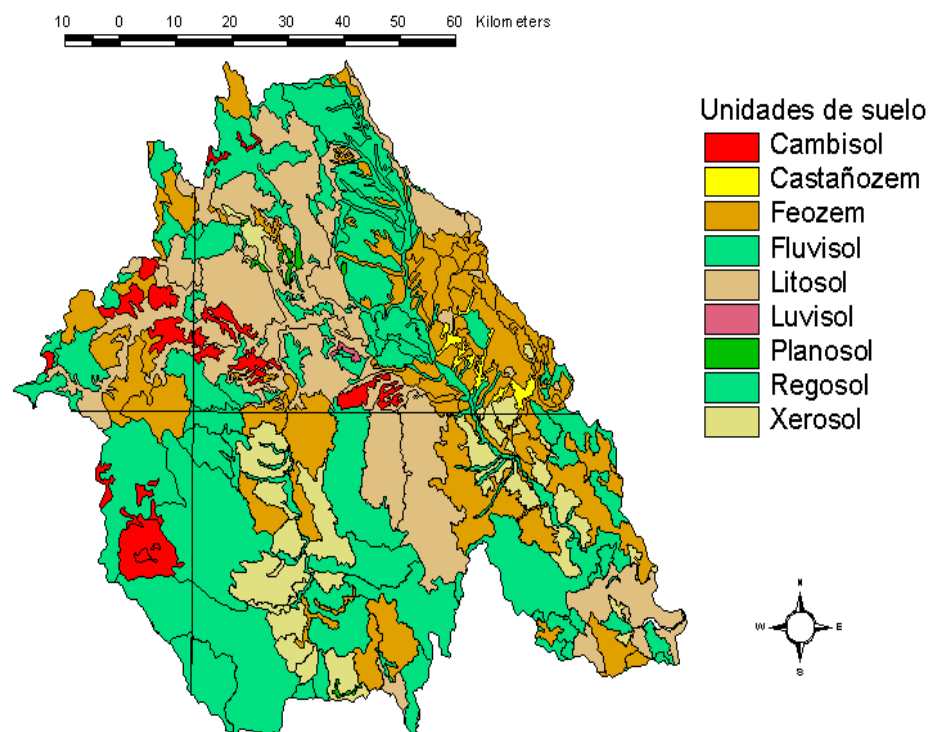


Figura 6. Distribución de las Unidades Edafológicas en la Cuenca del Río Sextín

- A) Cambisoles (B). Son suelos con un horizonte B cámbico y sin otros horizontes diagnósticos (a menos que estén recubiertos por mas de 50 cm. de material nuevo) que un horizonte A ócrico o húmico, un horizonte H hístico y un horizonte cálcico o gípsico; el horizonte B cámbico puede faltar cuando se halla presente un horizonte A úmbrico de espesor superior a los 25 cm; carecen de un horizonte altamente salino, crecen de las características diagnósticas de los vertisoles o andosoles; carecen de un régimen hidrométrico arídico; carecen de propiedades hidromórficas en los 50 cm. superiores.
- B) Castañozem (K). Suelos con horizonte “A” mólico de color pardo oscuro y de acumulación calcárea (horizonte cálcico). Se encuentran tres subunidades: castañozem lúvico cuya característica es la presencia de un horizonte “B”

argílico (capa de arcilla abajo del horizonte “A”), castañozem háplico con acumulación calcárea también abajo del horizonte “A”, y finalmente también se encuentra la subunidad háplica. Son comunes en zonas de cultivo y tienen alta productividad agrícola.

C) Feozems (H). Son suelos con un horizonte A mólico; carecen de horizonte cálcico, de horizonte gípsico y de concentraciones de cal blanda pulverulenta en los 125 cm. superiores; carecen de horizonte B nátrico; carecen de características diagnosticas de las rendzinas, vertisoles, planosoles o andosoles; carecen de horizonte altamente salino; carecen de propiedades hidromórficas en los 50 cm. superiores cuando no se halla presente ningún horizonte B argílico carecen de recubrimientos lixiviados en las superficies de los agregados edáficos estructurales cuando el horizonte A mólico tiene una intensidad cromática en húmedo de 2 o menos en los 15 cm. superiores.

D) Fluvisoles (J). Son suelos formados a partir de depósitos aluviales recientes sin mas horizontes diagnósticos (a menos que estén recubiertos por mas de 50 cm. de material nuevo) que un horizonte A ócrico, un horizonte H hístico o un horizonte sulfúrico. En la presente definición se entiende como materiales aluviales recientes los sedimentos fluviales marinos, lacustres o coluviales caracterizados por una o más de las propiedades siguientes:

(a) Un contenido de materia orgánica que disminuye irregularmente con la profundidad o que se mantiene por encima de 0.35% hasta una profundidad de 125 cm. (los estratos delgados de arena pueden tener un menor contenido de materia orgánica si los sedimentos mas finos situados por debajo se ajustan a los requisitos);

- (b) Reciben materiales nuevos a intervalos regulares y/o muestra una estratificación fina;
 - (c) Contiene materiales sulfhídricos en los 125 cm. superiores.
- E) Litosoles (I). Son suelos cuya profundidad están limitados por un estrato de roca coherente dura, y continúa en los 10 cm. superiores. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona donde se encuentren, pudiendo ser desde moderada hasta a alta.
- F) Luvisoles (L). Son suelos que poseen un horizonte argílico con una saturación de bases (por NH_4OAc) del 50 por ciento o más, al menos en la porción inferior del horizonte B en los 125 cm superiores; carecen de horizonte A mólico; carecen de horizonte E albico subyacente a un horizonte de permeabilidad lenta, del régimen de distribución de la arcilla y de la penetración en forma de lenguetas que son rasgos diagnósticos de los planosoles, nitosoles y podzoluvisoles, respectivamente; carecen de un régimen hídrico árido.
- G) Planosoles (W). Son suelos que presentan debajo de la capa mas superficial, una capa mas o menos delgada de material claro, ácido e infértil que a veces impide el paso de las raíces, por debajo de esta capa se presenta un subsuelo arcilloso e impermeable o bien roca o un “tepetate”, son de climas semiáridos o templados, su vegetación natural es de pastizal. Son muy susceptibles a la erosión.
- H) Regosoles (R). Son suelos formados a partir de materiales no consolidados a excepción de depósitos aluviales recientes sin mas horizontes diagnósticos (a menos de que estén recubiertos por mas de 50 cm. de material nuevo) que un horizonte A ócrico; carecen de propiedades hidromórficas en los 50 cm.

superiores carecen de las características diagnósticas de los vertisoles y andosoles; carecen de un horizonte altamente salino en los 125 cm superiores; cuando son de textura gruesa carecen de lamelas de acumulación arcillosa, rasgos propios de los horizontes B cámbico u óxico o material álbico característico de los arenosoles.

- I) Xerosoles (X). Son suelos que se manifiestan en un régimen higrométrico árido; poseen un horizonte A óxico muy débilmente desarrollado y una o mas de las propiedades siguientes; un horizonte B cámbico, un horizonte B argílico, un horizonte calcico o un horizonte gípsico; carecen de otros horizontes diagnósticos, carecen de las características diagnósticas de los vertisoles; carecen de un horizonte altamente salino; carecen de un horizonte permanentemente helado en los 200 cm. superiores.

Uso de Suelo y Vegetación

Esta información se obtuvo de las cartas de Uso de suelo y Vegetación de INEGI escala 1:250,000 (INEGI, 1987). En dichas cartas se representan los mismos marcos de referencia que en la carta topográfica, así como algunos otros elementos que contiene ésta. En todas las escalas se indica la distribución de la vegetación natural o la inducida por diferentes actividades humanas; dicha vegetación se clasifica de acuerdo con los tipos fisonómicos, que establecen las características más sobresalientes de la forma, tamaño y ubicación ecológica. La carta señala, en el caso de ser vegetación secundaria, a qué tipo fisonómico corresponde la asociación de especies que están en proceso de desarrollo.

Otro aspecto que se indica en la carta es la clase de agricultura que se practica, así como el carácter de los cultivos, en lo referente a los ciclos de siembra o permanencia de los mismos (<http://www.inegi.gob.mx>).

A continuación se describe los principales tipos de vegetación que se encuentran en el área de estudio para la Serie II y la Serie I (Figura 7 y 8 respectivamente):

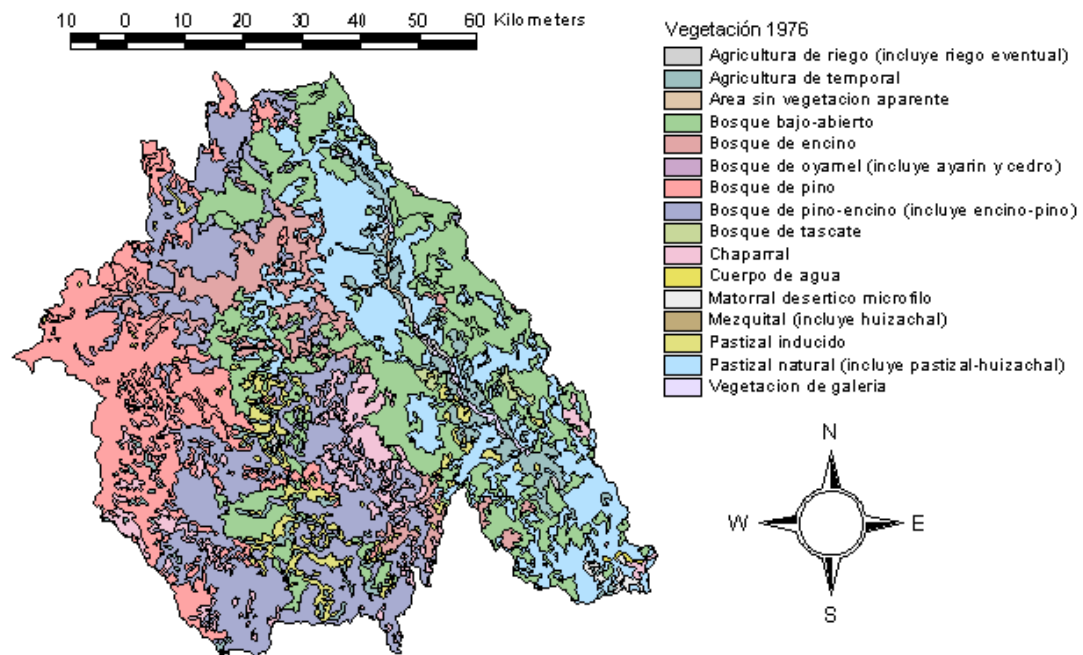


Figura 7. Distribución de los diferentes Usos de Suelo y Vegetación de la Serie I en la Cuenca del Río Sextín

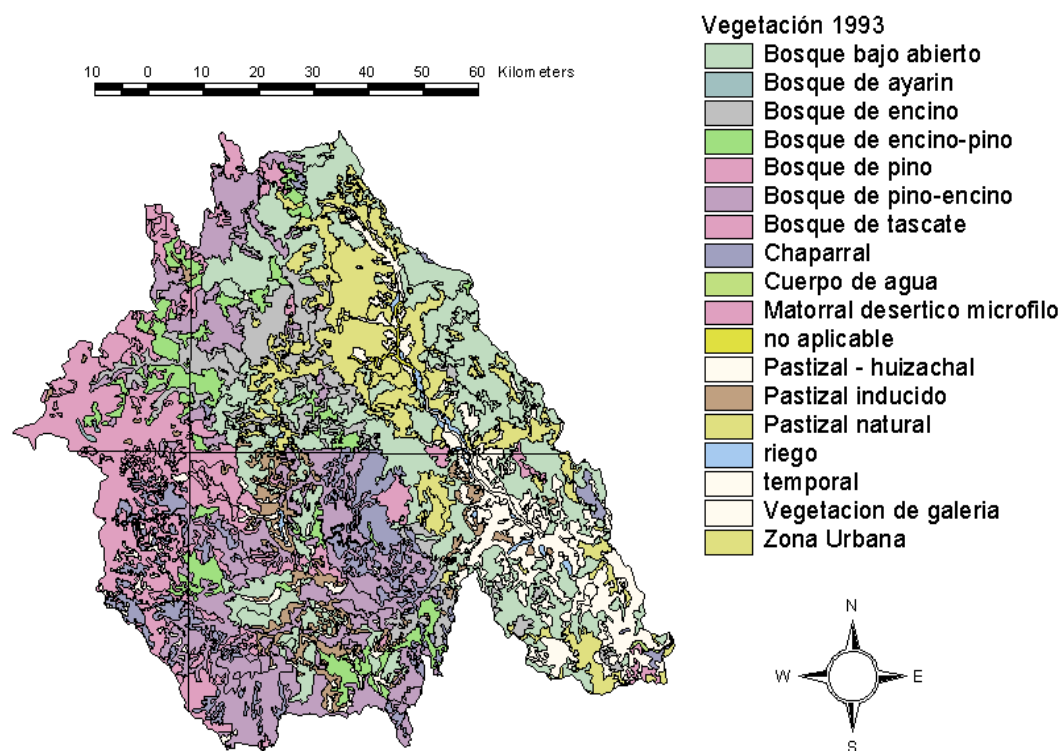


Figura 8. Distribución de los diferentes Usos de Suelo y Vegetación de la Serie II de la Cuenca del Río Sextín

- 1) Agricultura de Riego. Áreas donde el ciclo vegetativo de los cultivos está asegurado mediante el agua de riego, proporcionada por cualquier técnica. Se incluyen aquellas áreas con riegos parciales, ya sean de auxilio o de punteo.
- 2) Agricultura de Temporal. Terrenos donde el ciclo vegetativo de los cultivos depende del agua de lluvia y se siembran en un 80% de los años.
- 3) Pastizal Natural. Comunidad vegetal herbácea caracterizada por la dominancia de especies graminoides y cuyo desarrollo es el producto de la interacción del clima, suelo y biota de una región. Es equivalente a zacatal.

- 4) Pastizal Huizachal. Comunidad vegetal caracterizada por la asociación de especies gaminoides y *Acacia schaffneri* (huizache), se desarrolla en terrenos planos o con poca pendiente en áreas del centro y norte del país. Se encuentra en contacto con el pastizal natural y difiere de este por su fisonomía tipo Sabana, limita además con el Matorral crasicaule y con el matorral subtropical.
- 5) Pastizal Inducido. Es el que surge espontáneamente al ser eliminada la vegetación original. Puede ser consecuencia de un desmonte, del abonado de un área agrícola, de un sobrepastoreo o de un incendio.
- 6) Bosque de Ayarín. Comunidades de árboles representadas por las especies mexicanas *Pseudotsuga* y *Picea*, formadas en altitudes entre 2000 y 3200 m, en sitios sombríos y húmedos, preferentemente en ladera de cañadas y barrancas o valles muy protegidos, que en general ocupan superficies muy reducidas en medio de pinares y muchas veces se representan como masas mixtas principalmente con *Pinus* y *Abies*.
- 7) Bosque de Pino. Vegetación arbórea constituida por diferentes especies del género *Pinus*, de amplia distribución en las cadenas montañosas del país, desde cerca de los 300 m., hasta el límite altitudinal de los bosques 4200 msnm.
- 8) Bosque de Pino-Encino. Comunidades de árboles formadas por diferentes especies de *Pinus spp* (pino) y *Quercus spp* (encino) con dominancia de los primeros. Se encuentran en casi todo los sistemas montañosos del país, principalmente entre los 1000 y 2800 m de altitud.
- 9) Bosque Encino-Pino. Comunidad de árboles de los géneros *Quercus* y *Pinus* con dominancia del primero. Se desarrolla en diferentes condiciones ecológicas,

siendo frecuente en áreas forestales muy explotadas o en condiciones de disturbio del bosque de Pino o de Pino-Encino.

10) Bosque de Encino. Bosque formado por individuos del género *Quercus* (Encino, Roble) en muy diferentes condiciones ecológicas, que abarcan desde cerca del nivel del mar hasta los 2800 m.

11) Bosque de Tascate. Comunidad vegetal formada por individuos escumifoliados del género *Juniperus* que se desarrolla principalmente en regiones subcálidas a templadas, mas o menos secas, en contacto con bosques de Encino, Pino-Encino, selva baja caducifolia y matorrales de zonas áridas.

12) Bosque Bajo Abierto. Bosque de árboles bajos y frecuentes claros generalmente grandes. Se localiza entre pastizales y bosques de encino (*Quercus spp*).

13) Chaparral. Asociación generalmente densa, de elementos arbustivos resistentes al fuego, formada principalmente por *Quercus spp* (encinos) y/o *Adenostoma spp*, *Arctostaphylos spp* (manzanita), *Cercocarpus spp* (rosa de castilla) y otras especies. Comúnmente se le encuentra por arriba del nivel de los matorrales de zonas áridas y semiáridas, de pastizales neutrales y en ocasiones mezclada con los bosques de Pino y de Encino.

14) Matorral Desértico Micrófilo. Tipo de vegetación formado por elementos arbustivos de hoja o foliolo pequeño que se desarrolla principalmente sobre terrenos aluviales en las zonas áridas y semiáridas del país. Se le divide en 4 categorías por su fisonomía:

(1) Matorral Inerme.- Comunidad formada por más del 70% de plantas sin espinas, como los matorrales de *Larrea tridentata* (gobernadora),

Flourensia cernua (hojasén), *Cordia greggi* (nagua blanca o trompillo), *Ambrosia dumosa* (hierba del burro), etc.

(2) Matorral subinermes.- Comunidad compuesta por plantas espinosas e inermes cuya proporción de unas y otras es mayor de 30% y menor de 70%.

(3) Matorral espinoso.- Comunidad formada por más del 70% de plantas espinosas. Entre los matorrales de este tipo son frecuentes los *Prosopis spp* (mezquite), *Mimosa spp* (uña de gato), *Acacia amentacea*, *Acacia vernicosa* (chaparro prieto), etc.

(4) Matorral con izotes.- Comunidad formada por la asociación de palmas o izotes, en terrenos aluviales principalmente, siendo los más frecuentes los de *Yucca filifera* y *Yucca decipiens* (palma china).

15) Vegetación de Galería. Agrupaciones arbóreas que se desarrollan a lo largo de las corrientes de agua más o menos permanentes. Fisonómicamente es un grupo muy heterogéneo pues su altura varía de 4 a 40 m de altura y comprende árboles de hoja perenne, decidua o parcialmente decidua. Puede incluir numerosas trepadoras y epifitas o carecer por completo de ellas y si bien a veces forma una gran espesura, a menudo esta constituido por árboles muy espaciados e irregularmente distribuidos. Incluyen los géneros *Platanus*, *Populus*, *Prunus*, *Prosopis*, *Salís* y *Taxodium* entre otros. Diversos arbustos pueden participar en estas comunidades y a menudo en ausencia de árboles asumen el papel de dominantes, formando matorrales que pueden ser densos o espaciados. Generalmente miden 1 o 2 m de alto y son perennifolios; los

géneros frecuentemente encontrados son: *Acacia*, *Aeschynomene*, *Baccharis*, *Dalbergia*, *Lindenia*, *Mimosa*, *Solanum*, *Vallesia*, etc.

16) Área sin vegetación aparente. Se incluyen es este concepto los eriales, depósitos de litoral, dunas y bancos de ríos que se encuentran desprovistos de vegetación o ésta no es aparente para considerarla bajo alguno de los otros conceptos de vegetación.

Modelo Digital de Elevación

El MDE utilizado fue generado por INEGI a escala 1:50 000 y tiene las siguientes características (<http://www.inegi.gob.mx>):

- Los valores de "z" son de altitud o de alturas ortométricas, en unidades enteras de metro y están referidos al nivel medio del mar, con base en el datum vertical para norteamérica de 1929 (NAVD29).
- Los puntos del MDE están referenciados horizontalmente al sistema de coordenadas de proyección UTM (Universal Transversa de Mercator). El Sistema de referencia geodésico es NAD27.
- El cubrimiento de cada MDE corresponde al formato regular de 15' de latitud por 20' de longitud de la cartografía elaborada a esa escala por el INEGI.
- La resolución espacial entre las intersecciones de la retícula de elevaciones es de 50 metros en las dos direcciones, es decir, la retícula forma una cuadrícula regular de 50x50 metros de lado (Figura 9).

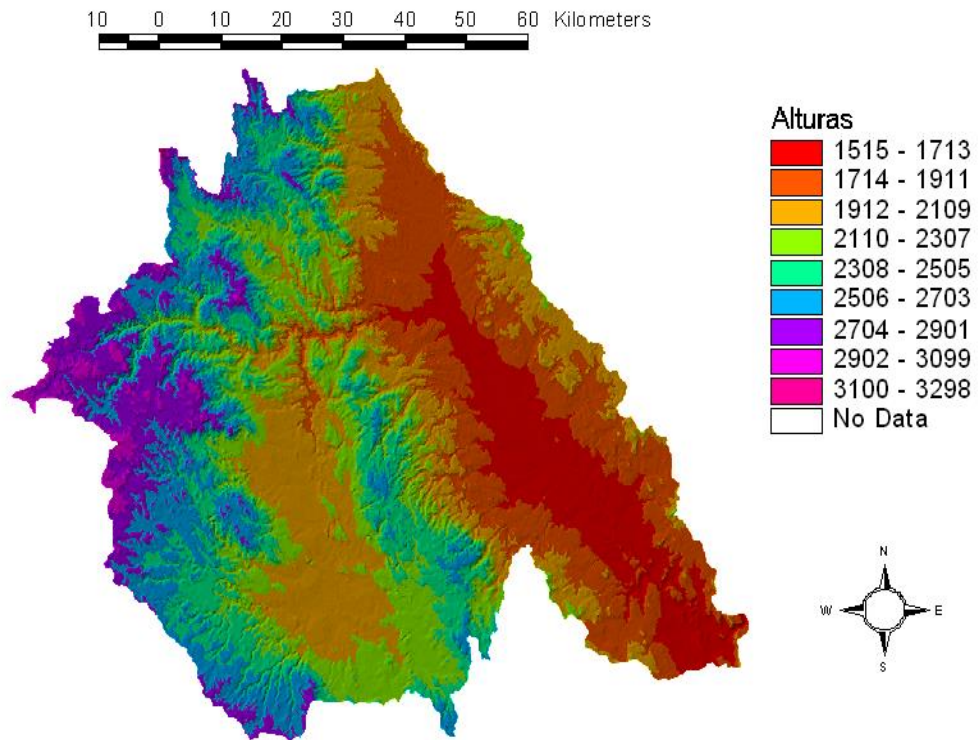


Figura 9. Modelo Digital de Elevación de la Cuenca del Río Sextín.

Análisis de cambio de uso de suelo

Este análisis comparó dos series de vegetación con un tiempo de realización promedio entre ellas de 17 años, es decir, que la comparación se realizó con la vegetación obtenida 17 años después de la serie de vegetación inicial. Las series utilizadas en este estudio son las siguientes:

Serie I (INEGI)

La cartografía de uso del suelo y vegetación del INEGI, escala 1:250,000, se elaboró con base en la interpretación de fotografías aéreas tomadas entre los años 1968 y 1986, así como un intenso trabajo de campo. El sistema clasificatorio es muy detallado: comprende más de 600 clases que dan cuenta de los diferentes tipos de vegetación con

base en criterios de fisonomía, florística, fenología y estado de conservación, de los tipos de uso del suelo así como de la presencia de erosión. No existe evaluación cuantitativa de la confiabilidad de la cartografía de uso del suelo y vegetación del INEGI aunque, generalmente, se acepta que los datos son de buena calidad. Los datos originales existían únicamente en formato analógico por lo cual se hicieron diferentes esfuerzos de digitalización de esta información como el realizado por el Instituto Nacional de Ecología (INE) que se describe a continuación:

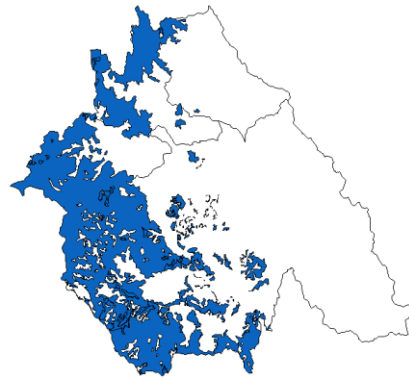
Serie I (INEGI digitizada por INE)

La transformación de esta cartografía en formato digital se realizó mediante la captura directa de los mapas con una tableta digitalizadora. El sistema clasificatorio comprende 375 clases. Se desconoce la existencia de informe técnico alguno sobre este trabajo; tampoco existe una evaluación de la calidad de la captura de la base digital. El producto es una cobertura nacional en formato Arc/info en proyección Lambert.

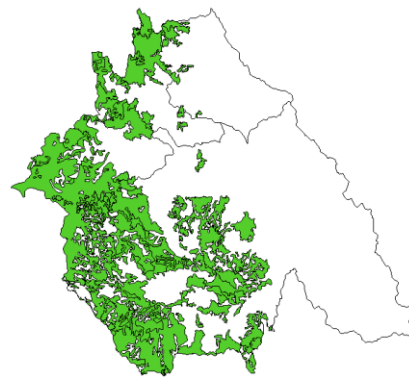
Serie II (INEGI insumo base para el IFN 2000)

Al principio de los 90's, el INEGI llevó a cabo una actualización de la cartografía serie I con base en la interpretación visual de espaciomapas. Los espaciomapas fueron derivados de la composición a color de imágenes Landsat TM (combinación de bandas del infrarrojo y visible 4, 3, 2) impresos a escala 1:250,000. El sistema clasificatorio es aún más detallado que el de la serie I con aproximadamente 600 categorías. Los datos se encuentran en formato digital (shape de Arcview).

La Figura 10 muestra un ejemplo del cálculo de cambio de vegetación para la categoría Bosque de Pinos:



Se calculó la superficie (ha) ocupada por la categoría pinos en la Serie I.



Se calculó la superficie (ha) ocupada por la categoría pinos en la Serie II.

Figura 10. Comparación entre superficies de tipos de vegetación en formación principal de Serie I con la Serie II de INEGI

El resultado de la sobreposición entre la vegetación de Bosque de Pinos en las dos fechas estudiadas determino el crecimiento o decremento de la superficie de la vegetación entre 1976 y 1993.

Procesamiento del Modelo SWAT

El modelo hidrológico SWAT versión 2000 está integrado a la interfase del SIG ArcView® 3.2. El modelo SWAT trabaja y se instala como una extensión de ArcView® generando una ventana de entrada similar a la de la Figura 11.

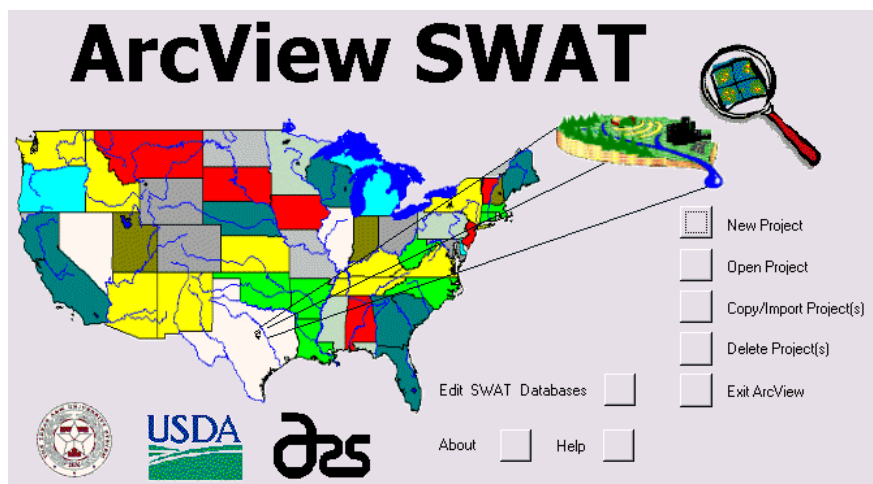


Figura 11. Ventana de inicio de SWAT.

La ventana de inicio permite al usuario: iniciar un nuevo proyecto (New Project), abrir un proyecto ya existente (Open Project), copiar un proyecto o importarlo a otro programa compatible con Arcview (Copy/Import Project), borrar un proyecto (Delete Project) y abandonar el SIG Arcview. Además cuenta con la opción de modificar las bases de datos (Edit SWAT Databases) con las cuales se realizan las simulaciones dentro de SWAT (suelos, cobertura vegetal, clima, etc.).

Los insumos requeridos por la interface son: el modelo digital de elevación, mapa digital de uso de suelo y vegetación, mapa digital de edafología y bases de datos climáticas. Como primer insumo requerido del software se tuvo el MDE, se explica a continuación como fue procesado (Figura 12).

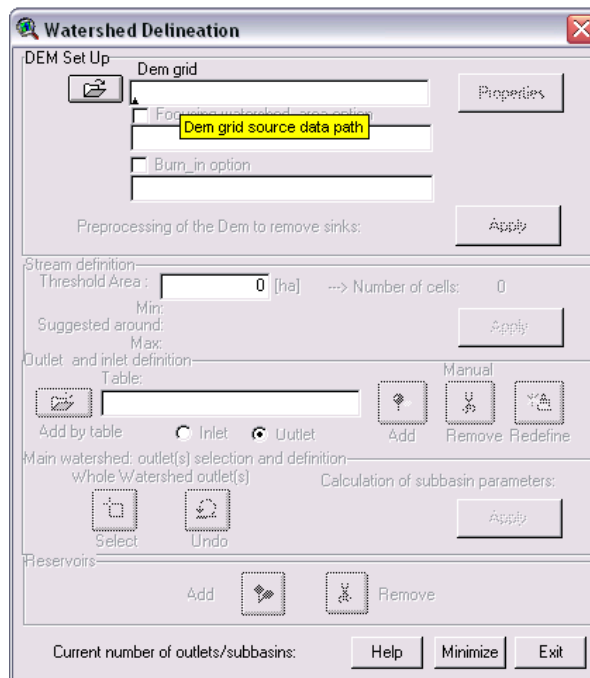


Figura 12. Ventana de procesamiento de MDE en SWAT.

Después de haber creado un proyecto nuevo para guardar toda la información que se va a insertar al modelo se procede a importar el MDE del directorio de trabajo del usuario, es recomendable que todos los mapas digitales y los datos usados por el modelo se encuentren en una sola ruta para facilitar el trabajo, pues información dispersa genera ambigüedades que posteriormente pueden generar errores. El procesamiento del MDE y de todos los mapas de la interfase SWAT consta de pasos sucesivos y requeridos, es decir, no se puede procesar el mapa digital de suelos sin antes haber configurado el MDE.

Luego de cargar el MDE, se carga una cobertura digital con el límite previamente generado haciendo morfológicamente la delimitación de la Cuenca, esto es, un límite que acote el MDE para que el SWAT tome en cuenta toda la unidad de interés que se

trabajó, en nuestro caso, la Cuenca del Río Sextin en la parte Alta de la Cuenca del Río Nazas.

Paso sucesivo se genera la red hidrológica digital, indicándole al modelo que relacione, los drenajes (streams), a esta red a partir del MDE.

Luego de ser procesado el MDE, se requiere especificar el área mínima utilizada para definir los elementos geométricos, esto depende del nivel de detalle que se quiera analizar, para lo cual después de ser procesado el MDE, se da la opción de moverse entre un límite inferior y superior de área para generar elementos geométricos, si se desea por ejemplo solo analizar el drenaje principal de la cuenca se utiliza el límite de área superior, si se quieren generar todos los elementos geométricos se utiliza el área mínima. Si se escoge un área pequeña se clasifican más elementos geométricos, pero el proceso de cómputo es más exigente en cuanto a recursos de memoria, procesador de PC y tiempo de procesamiento (Figura 13).

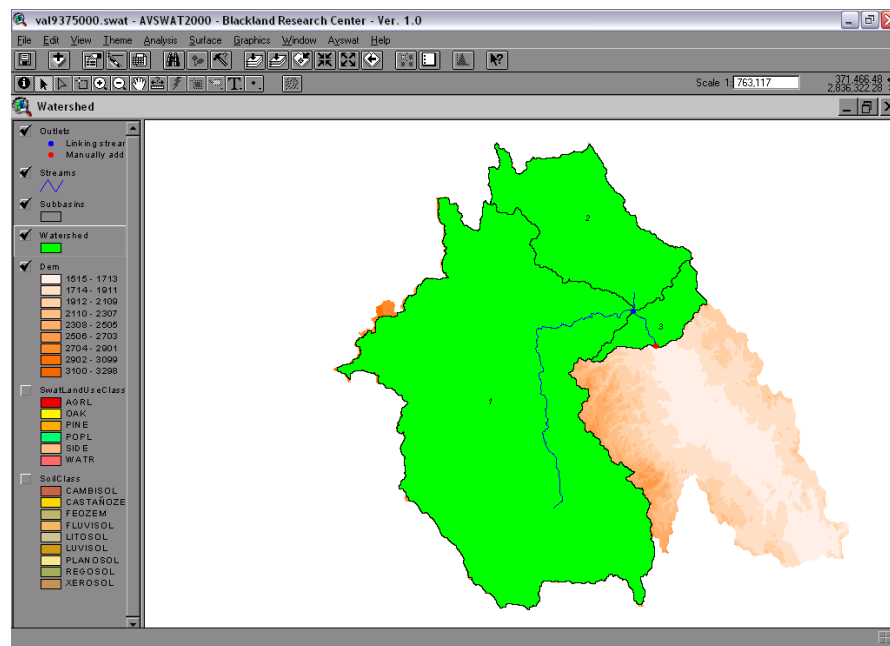


Figura 13. Delimitación de área y elementos geométricos a partir del Modelo Digital de Elevación

Se seleccionó un área de generación de 75,000 ha como un área representativa de manejo, áreas menores de elementos geométricos generados son el resultado de áreas remanentes.

Después de la elección del área mínima, se escoge la salida principal de la cuenca la cual corresponde, en nuestro caso, a la desembocadura de la Presa Lázaro Cárdenas al Sureste de la cuenca, pero debido a que no existe una estación hidrométrica en la salida de la cuenca del Río Sextín se decidió tomar como salida de la cuenca a la estación hidrométrica Sardinas generándose así un tamaño de cuenca de 497,330 ha. La razón principal para la modificación de la cuenca fue contar con datos reales observados de caudal para contrastarlos con los datos simulados (Figura 14).

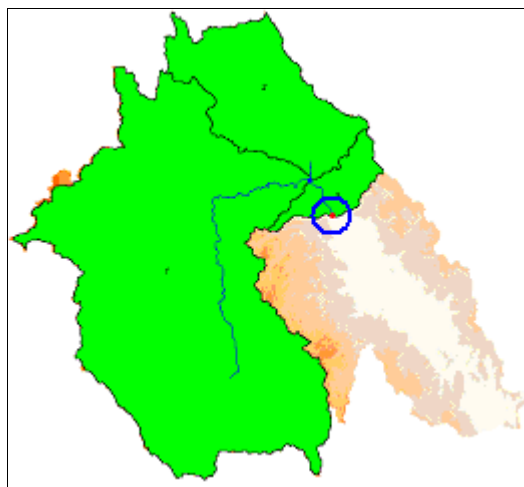


Figura 14. Salida del drenaje principal de la Cuenca del Río Sextín.

Una vez generada y delimitada la cuenca con sus elementos geométricos se pasa el módulo de asignación de Uso del Suelo y Caracterización de suelos.

Mapa Digital de Uso de Suelo y Vegetación

Los mapas digitales de uso de suelo que se utilizaron se basaron en la cartografía de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI escala 1:250,000 (INEGI, 1987) para el caso de la Serie I y la versión actualizada de esta misma para la Serie II. En la Tabla 1 se muestran las coberturas vegetales y uso de suelo en la Cuenca del Río Sextín.

Tabla 1. Tipos de Uso de suelo y Vegetación (Serie I y Serie II) en la Cuenca del Río Sextín

Uso de suelo y Vegetación Serie I	% de área
Bosque bajo abierto	17.48
Bosque de oyamel (incluye ayarín)	0.09
Bosque encino	7.79
Bosque pino	21.50
Bosque pino-encino (encino-pino)	28.81
Chaparral	4.24
Mezquital	0.01
Area sin vegetación aparente	0.22
Pastizal inducido	3.89
Pastizal natural	11.68
Riego	0.25
Temporal	3.93
Vegetación de galería	0.12

Uso de suelo y Vegetación Serie II	% de área
Bosque bajo abierto	18.09
Bosque de ayarín	0.09
Bosque encino	7.78
Bosque encino-pino	6.77
Bosque pino	20.65
Bosque pino-encino	22.02
Chaparral	4.86
Cuerpo de agua	0.01
Area sin vegetación aparente	0.25
Pastizal inducido	3.92
Pastizal natural	11.21
Riego	0.26
Temporal	3.95
Vegetación de galería	0.14

Debido a la gran cantidad de datos fisiográficos de las diferentes coberturas que necesita el SWAT, es una labor complicada generar para cada uso de suelo en particular estas bases de datos, debido a la información escasa que se maneja en nuestro medio, por

lo que hay que homologar las coberturas de la Serie I y II con las coberturas que el software trae en su base de datos. La base de datos de SWAT incluye mas de 100 coberturas e incluye cultivos tan tradicionales en nuestro medio como maíz, frijol, papa, hortalizas, etc.

La Tabla 2 presenta la base de datos de SWAT correspondiente a la vegetación usada en la Serie I y II:

Tabla 2. Reclasificación de polígonos de Uso de Suelo y Vegetación (Serie II y Serie I) para SWAT.

Código de GRID	Uso de suelo y Vegetación Serie I	Clave SWAT
1	Bosque bajo abierto	OAK (<i>Quercus</i>)
2	Bosque de oyamel (incluye ayarín)	OAK (<i>Quercus</i>)
3	Bosque encino	OAK (<i>Quercus</i>)
4	Bosque pino	PINE (<i>Pinus</i>)
5	Bosque pino-encino (encino-pino)	PINE (<i>Pinus</i>)
6	Chaparral	OAK (<i>Quercus</i>)
7	Mezquital	MESQ (<i>Prosopis</i>)
8	Area sin vegetación aparente	WATR (not aplicable)
9	Pastizal inducido	SIDE (<i>Boutelova</i>)
10	Pastizal natural	SIDE (<i>Boutelova</i>)
11	Riego	AGRL (Agricultural Land-Row Crops)
12	Temporal	AGRL (Agricultural Land-Row Crops)
13	Vegetación de galería	POPL (<i>Populus</i>)

Código de GRID	Uso de suelo y Vegetación SerieII	Clave SWAT
1	Bosque bajo abierto	OAK (<i>Quercus</i>)
2	Bosque de ayarín	OAK (<i>Quercus</i>)
3	Bosque encino	OAK (<i>Quercus</i>)
4	Bosque encino-pino	OAK (<i>Quercus</i>)
5	Bosque pino	PINE (<i>Pinus</i>)
6	Bosque pino-encino	PINE (<i>Pinus</i>)
7	Chaparral	OAK (<i>Quercus</i>)
8	Cuerpo de agua	WATR (not aplicable)
9	Area sin vegetación aparente	WATR (not aplicable)
10	Pastizal inducido	SIDE (<i>Boutelova</i>)
11	Pastizal natural	SIDE (<i>Boutelova</i>)
12	Riego	AGRL (Agricultural Land-Row Crops)
13	Temporal	AGRL (Agricultural Land-Row Crops)
14	Vegetación de galería	POPL (<i>Populus</i>)

La anterior clasificación se constituye en el escenario real o base para cumplir nuestro objetivo de correr el modelo con los datos de la cuenca. En la Figura 17 se

muestra la ventana de reclasificación de los mapas digitales en formato tipo raster del tema de Uso del Suelo.

La Figura 15 muestra la homologación de las coberturas que se da en la opción reclasificar (“Reclassify”), y asigna los valores homologados a cada polígono del Mapa Digital de Uso de Suelo y Vegetación obteniéndose la siguiente vista (View).

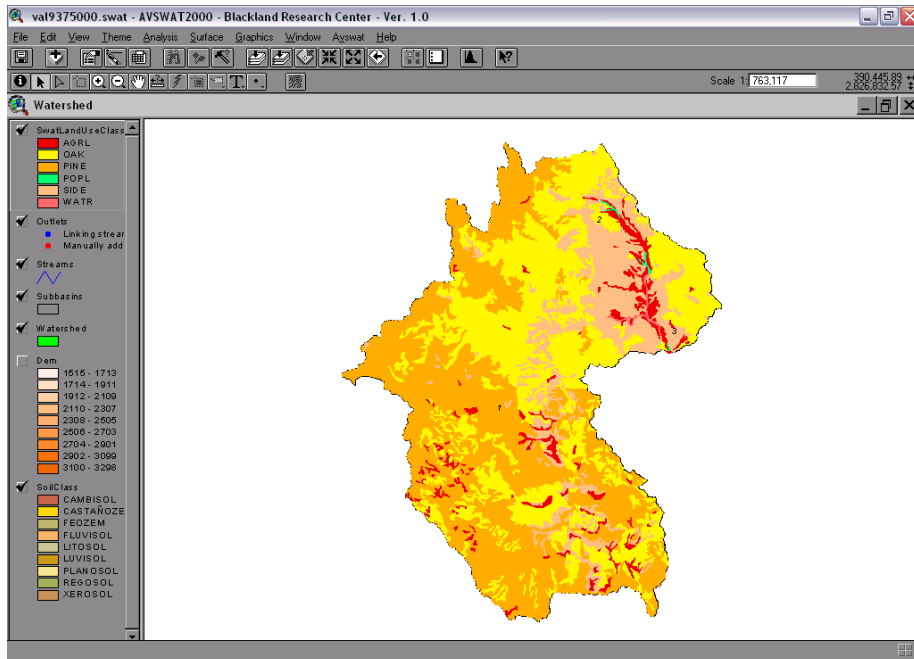


Figura 15. Mapa digital de Uso de suelo y Vegetación Reclasificado para la Serie II.

Mapa Digital de Suelos

El mapa digital de edafología que se generó se basó en la cartografía de Edafología de INEGI escala 1:250,000 (Cartas G13-4, G13-5, G13-7 y G13-8).

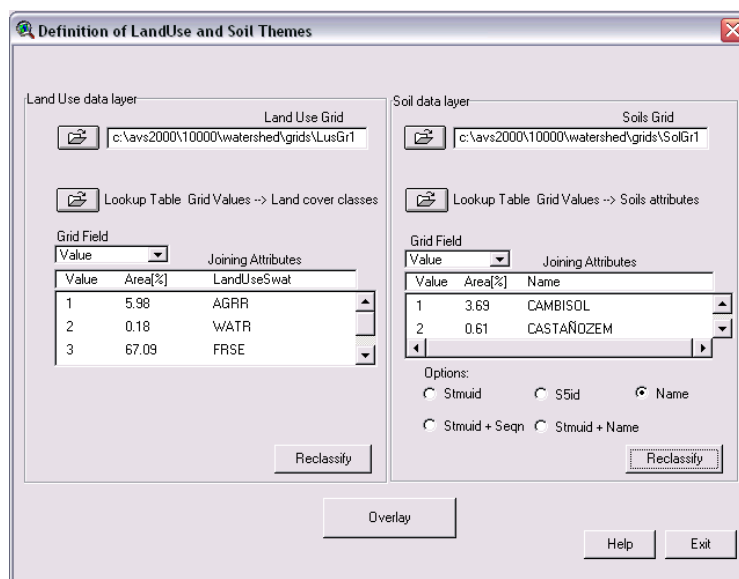


Figura 16. Ventana de definición del de Uso de la Tierra y Tipos de Suelo.

La interfase Arcview® SWAT posee una base de datos con suelos de Estados Unidos de Norteamérica, por lo que hay que adecuar la bases de datos para México y de esta manera satisfacer los parámetros de entrada a la interface y al modelo. Se describen a continuación los parámetros requeridos y la forma en que se obtuvieron; algunos son de fácil acceso ya que son explícitos en los mapas de INEGI (escala 1:250,000) que contienen información detallada de cada tipo de suelo.

User Soils

By Soil

SNAM: CAMBISOL

NLAYERS: 1 [1 to 10]

HYDGRP: C [A, B, C or D]

SOL_ZMX: 400.00 [mm]

ANION_EXCL: 0.500 [fraction]

SOL_CRK: 0.000 [m3/m3]

TEXTURE: MIGAION-ARENOSO

By Layer

SOL_Z: 400.00 [mm]

SOL_BD: 1.50 [g/cm3]

SOL_AWC: 0.07 [mm/mm]

SOL_K: 100.00 [mm/hr]

SOL_CBN: 2.50 [% soil weight]

CLAY: 12.00 [% soil weight]

SILT: 28.00 [% soil weight]

SAND: 60.00 [% soil weight]

ROCK: 0.00 [% total weight]

SOL_ALB: 0.20 [fraction]

USLE_K: 0.17 [0.013 t m² hr/(m3 t cm)]

SOL_EC: 1.00 [dS/m]

Up 1 Down

Layer

Delete Load [Sol] Add New [Modify] Add New Help Exit

Figura 17. Ventana de creación / edición propiedades de suelos.

Descripción de los parámetros de entrada de suelo requeridos por SWAT

- SNAM: Nombre para caracterizar el suelo
- NLAYERS: Número de horizontes del perfil de suelos. Capacidad de hasta 10 horizontes.
- HYDGRP: Grupo hidrológico del suelo, este parámetro está íntimamente ligado con el tipo de infiltración del suelo. Los factores más importantes que afectan esta propiedad del suelo son descritos por Jaramillo (2002).
 - El contenido de humedad que presente el suelo al momento de hacer la evaluación: a mayor contenido de humedad, menor será la velocidad de infiltración.

- El tipo de poros: si en el suelo predominan los poros finos, la infiltración será baja; este tipo de poros puede estar relacionado con texturas finas y/o poco desarrollo estructural, así como problemas de compactación.
- La homogeneidad del perfil del suelo: en suelos de perfil homogéneo se presenta una alta continuidad en el espacio poroso, la cual facilita el movimiento del agua y su infiltración; cuando hay contrastes texturales y estructurales en el interior del suelo, estos pueden generar interrupciones en los poros, o reducciones drásticas en el tamaño de ellos que desaceleran el flujo del agua y la infiltración.
- El tiempo de suministro de agua al suelo, sea por riego o por lluvia.

Tabla 3. Grupo hidrológico del suelo según texturas

Tipo de suelo	Textura de suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla: Suelos muy permeables
B	Arenas finas y limos
C	Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcillas
D	Arcillas en grandes cantidades: suelos poco profundos con sub-horizontes de roca sana; suelos muy impermeables

A partir de los conceptos anteriores y la Tabla 3 (según texturas) se clasificaron los suelos de las unidades presentes en la cuenca para su grupo hidrológico.

- SOL_ZMX: Profundidad máxima de las raíces a través del suelo.
- SOL_Z: Profundidad del horizonte en mm.
- SOL_BD: Densidad aparente del suelo.
- SOL_AWC: humedad aprovechable del suelo.

- SOL_K: Conductividad hidráulica a saturación.
- SOL_CBN: Contenido de Carbono Orgánico en el suelo.
- CLAY: Contenido de arcilla. % de peso del suelo.
- SILT: Contenido de limo. % de peso del suelo.
- SAND: Contenido de arena. % de peso del suelo.
- ROCK: Contenido de fragmento de roca. % de peso total.
- SOL_ALB: Albedo o fracción de radiación solar que es reflejada por el suelo.
- USLE_K: Factor K de erodabilidad del suelo. Este factor representa la susceptibilidad que exhibe un suelo a la erosión como producto de algunas de sus características intrínsecas; el factor estima que la erodabilidad de un suelo puede ser explicada a partir de sus características de textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad (León, 2001).
- SOL_EC: Conductividad Eléctrica del suelo.

El método que sugieren los autores de SWAT (Neitsch *et al.*, 2002), para el cálculo de K, es el siguiente (Williams, 1995):

$$K_{USLE} = f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand}(22)$$

Donde:

$$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 * \exp \left[-0.256 * m_s * \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right) \dots\dots\dots(23)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \dots\dots\dots(24)$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.25 * orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95 * orgC]} \right) \dots\dots\dots(25)$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5.51 + 22.9 * \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right) \dots\dots\dots(26)$$

m_s = porcentaje de contenido de arena

m_{silt} = porcentaje de contenido de limo

m_c = porcentaje de contenido de arcilla

OrgC = es el porcentaje de contenido carbónico del horizonte en por ciento.

Las propiedades físicas y químicas de los suelos fueron tomadas de las cartas edafológicas escala 1:50,000 del área de estudio. En base a estos datos fueron calculados otros parámetros, como conductividad hidráulica, porcentaje de humedad aprovechable y el factor de erodabilidad. Para los dos primeros se usó la calculadora de características hidráulicas (Saxton *et al.*, 1986) la cual toma como base los porcentajes de arena, limo y arcilla para determinar dichos parámetros. Para el cálculo del factor K de erodabilidad del suelo se utilizó una hoja de cálculo Excel en la cual se utilizaron las ecuaciones anteriormente mostradas (ecuaciones de la 22 a la 26).

Unidades de Respuesta Hidrológica

Una vez hecho lo anterior, el siguiente paso es asignar a cada polígono de suelos su respectiva unidad en la base de datos (Figura 18). Luego la opción “Reclassify”, asigna a los polígonos los atributos de la base de datos de suelos creada anteriormente. Finalmente, en esta ventana, se aplica la opción superponer (“Overlay”), lo cual intersecta los polígonos y atributos del mapa de uso de suelo con los polígonos y atributos del mapa de suelos. Esto da lugar a uno de los elementos fundamentales de análisis del SWAT las Unidades de Respuesta Hidrológica (Hydrologic Response Unit, HRU).

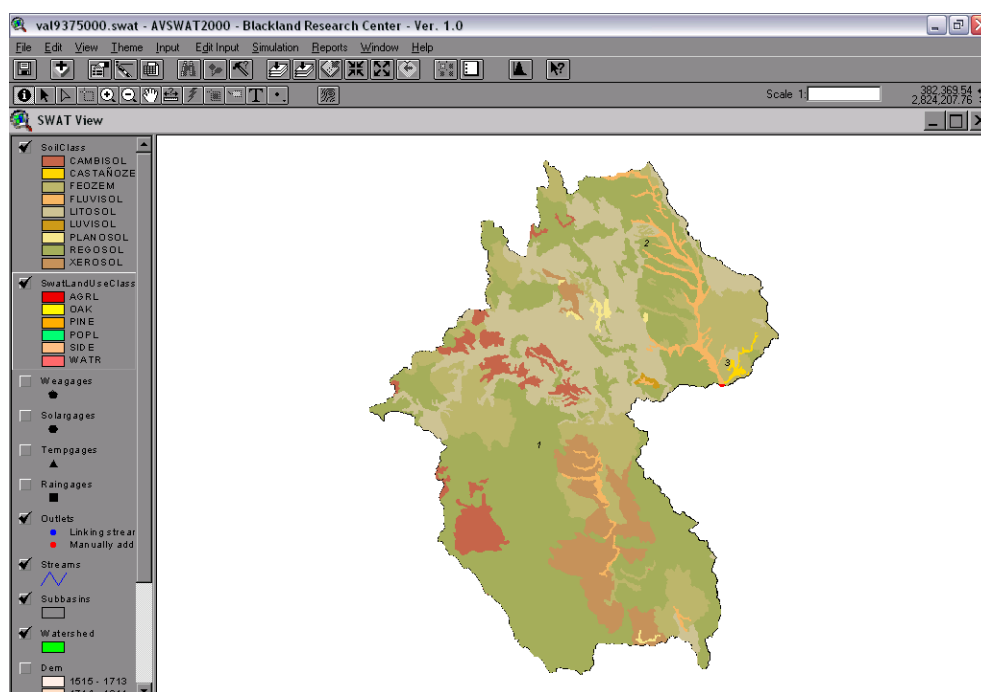


Figura 18. Mapa digital de Edafología Reclasificado.

Lo siguiente es seleccionar los criterios para generar la HRU's (Figura 19). Estas son una combinación única entre el Uso de Suelo y las Unidades de Suelo, lo cual genera condiciones particulares de relación entre cobertura y suelo que influye en el balance hídrico y en el proceso de modelación por medio de la Ecuación de pérdida de suelo modificada (MUSLE), puesto que se hace para cada HRU.

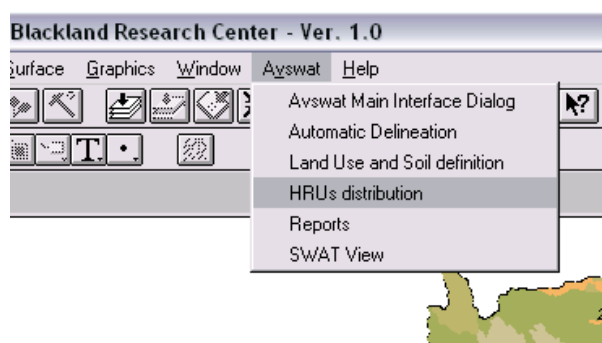


Figura 19. Selección de distribución y asignación de HRU

Después de asignar las HRUs, se genera otra vista, en todo el proceso hasta este momento el software trabajó en la vista "Watershed", a partir de ahora se trabaja en la vista llamada "Swat View".

Estaciones Meteorológicas

La información correspondiente a las estaciones de clima utilizadas fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Inicialmente se tuvieron 14 estaciones del área de estudio; la mayoría de ellas no tienen la información completa, por tal motivo, se redujo el número de estaciones debido a que para el procesamiento del SWAT es necesario, como mínimo, el uso de periodos de 5 años de información climática completa (precipitación, temperatura máxima, temperatura

mínima, radicaión solar). De esta manera los periodos seleccionados fueron 1975-1979, 1981-1985 y 1991-1995 en las estaciones indicadas en la Tabla 4.

La información utilizada para la simulación del clima fue: precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, velocidad de viento, radiación solar y humedad relativa.

La Tabla 4 presenta las estaciones de clima seleccionadas.

Tabla 4. Estaciones Meteorológicas seleccionadas para modelación del clima.

Clave	Nombre	Registro	Coordenadas		Elevación
			Latitud	Longitud	
10007	Ciénega de Escobar, Tepehuanes	35 años (desde 1966)	25°35'	105°40'	2144
10021	El Palmito, Inde	38 años (desde 1965)	25°31'	104°47'	1630
10026	El Tarahumar, Tepehuanes	42 años (desde 1965)	25°38'	106°21'	2560
10078	Sardinas, San Bernardo	33 años (desde 1971)	26°04'	105°34'	1600
10100	Santiago Papasquiaro	34 años (desde 1965)	25°02'	105°26'	1716

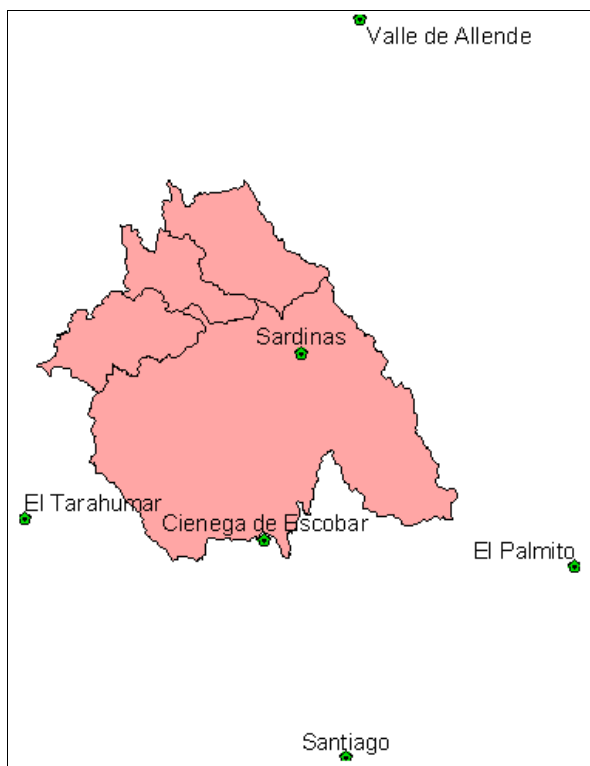


Figura 20. Ubicación de las estaciones climatológicas respecto a la Cuenca del Río Sextín

Procesamiento

En la vista SWAT se encuentra el menú “Input” en el cual se asignan los archivos de entrada de clima para todas y cada una de las variables requeridas. Estas pueden ser valores observados o pueden ser generados sintéticamente por el modelo (Figura 21). No es necesario que la estación este dentro de la cuenca, pero si se debe considerar las mas cercana a esta para poder interpolar los datos adecuadamente.

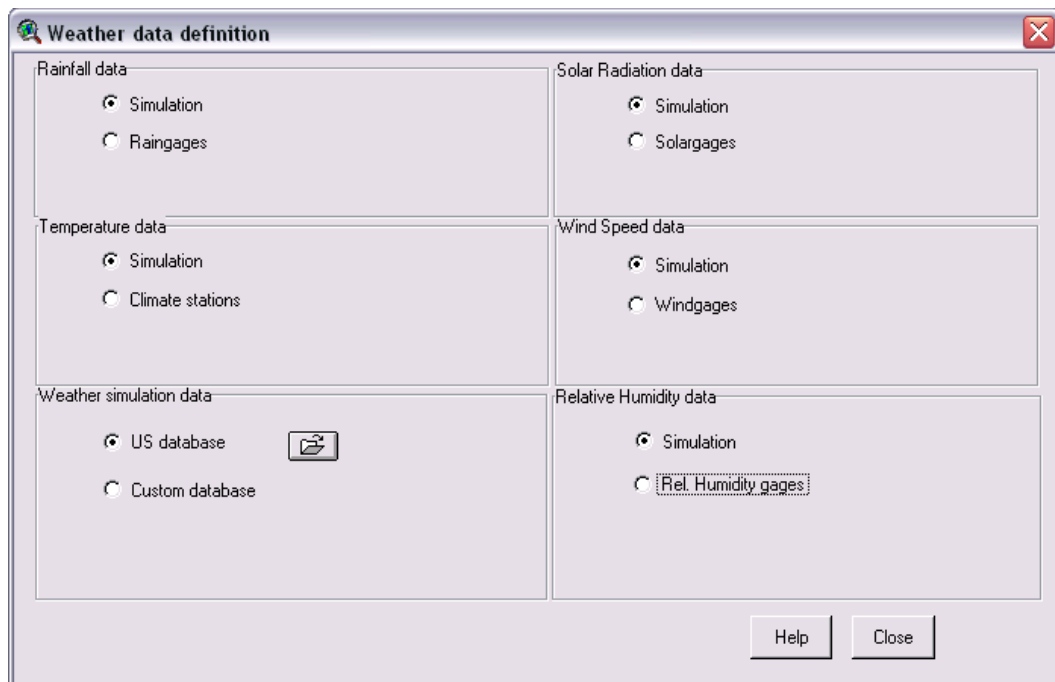


Figura 21. Ventana para definición de datos climáticos.

En la casilla “Rainfall data”, o datos de precipitación, se adjunta la ruta de acceso al archivo de precipitación en formato DBF. Este archivo tiene información en mm. De manera similar se adjuntan los archivos de radicación solar, temperatura, velocidad de viento y humedad relativa. La base de datos de localización de las estaciones se adiciona

en la casilla “Weather simulation data” con el nombre de las estaciones y sus coordenadas geográficas. En este apartado la base de datos que se ingresa es el resultado del uso del modelo generador de clima WXP3020 que corre bajo MS-DOS y a partir de datos históricos diarios de temperatura máxima, mínima y precipitación de cada estación se generó información estadística de las mismas.

Posteriormente se hizo un procedimiento semiautomático donde el SWAT compila la información de entrada “input” de las bases de datos. En este procedimiento el programa pide el valor del índice de rugosidad “ n ” de Manning el cual limita la velocidad del flujo por la condición granulométrica del lecho.

Después de generar las entradas se pasa al menú de SIMULACIÓN (“Simulation”) que se encuentra en la vista SWAT. La primera opción es “Run Swat” lo cual genera la ventana de corrida del programa (Figura 22).

Configuración y corrida de SWAT

SWAT permite la inclusión de lagos, lagunas, puntos de descarga de contaminantes, etc. En nuestro caso, solo modificamos las opciones necesarias para simular el escurrimiento superficial las cuales se presentan a continuación.

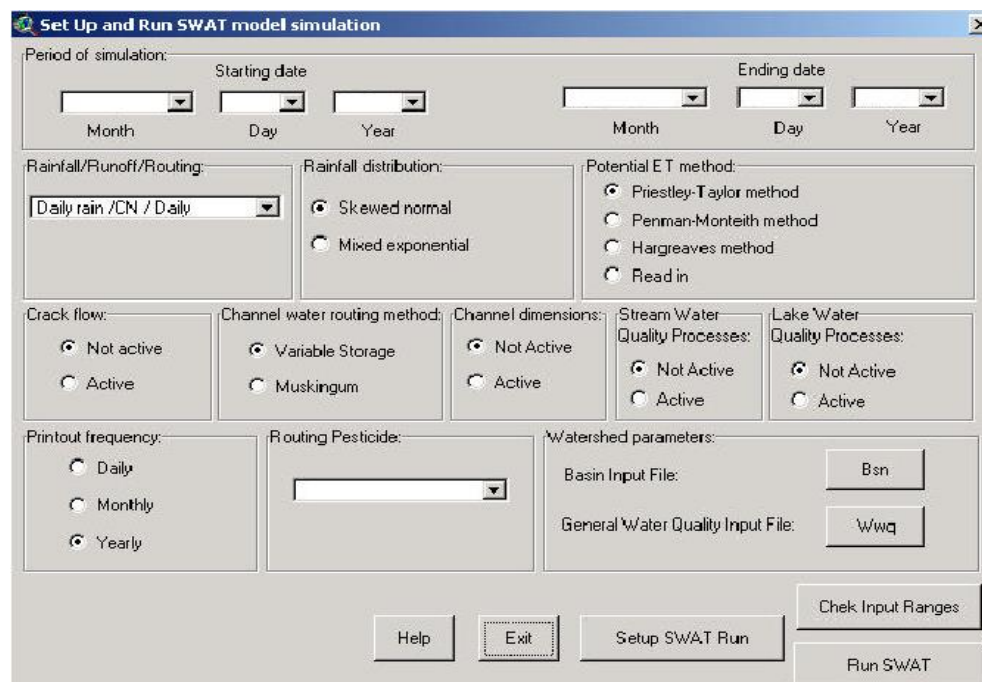


Figura 22. Ventana principal de configuración de corrida de SWAT.

En “Period of simulation” o periodo de simulación el software toma en cuenta solo dicho periodo para el análisis de los datos y la generación de los resultados. La resolución temporal del modelo es en base diaria, sin embargo, la presentación de resultados puede obtenerse además de lo anterior en base mensual y anual.

En “Potential ET Method” se escoge el método para calcular la evaporación potencial, ya explicado en la revisión de literatura del modelo.

Después de lo anterior se aplicó el comando SETUP SWAT RUN lo que hace que el programa prepare los datos para la corrida final. Después de esto se aplica el comando **RUN SWAT**. Con este comando termina el proceso de la información dentro de ArcView. La simulación del modelo se realiza fuera de ArcView en un archivo por lotes utilizando el sistema operativo MS-DOS (Figura 23).

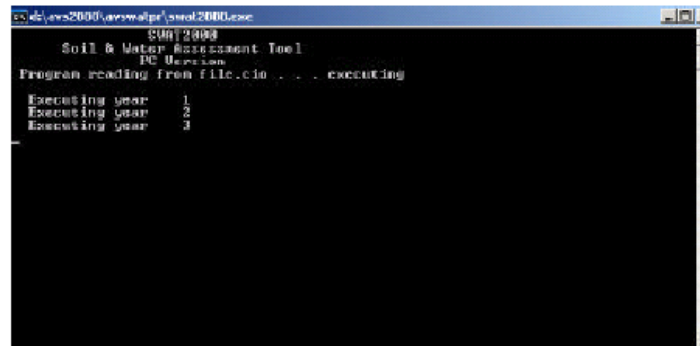


Figura 23. Corriendo la modelación de SWAT

Simulación de la Evapotranspiración

El modelo SWAT, como ya se ha explicado, puede calcular el balance hídrico por medio de tres métodos para estimar la Evapotranspiración, por lo cual, se hizo la generación de caudales por medio de los tres métodos para determinar cual de ellos se comportaba mejor en la descripción del caudal medido (Figura 24).

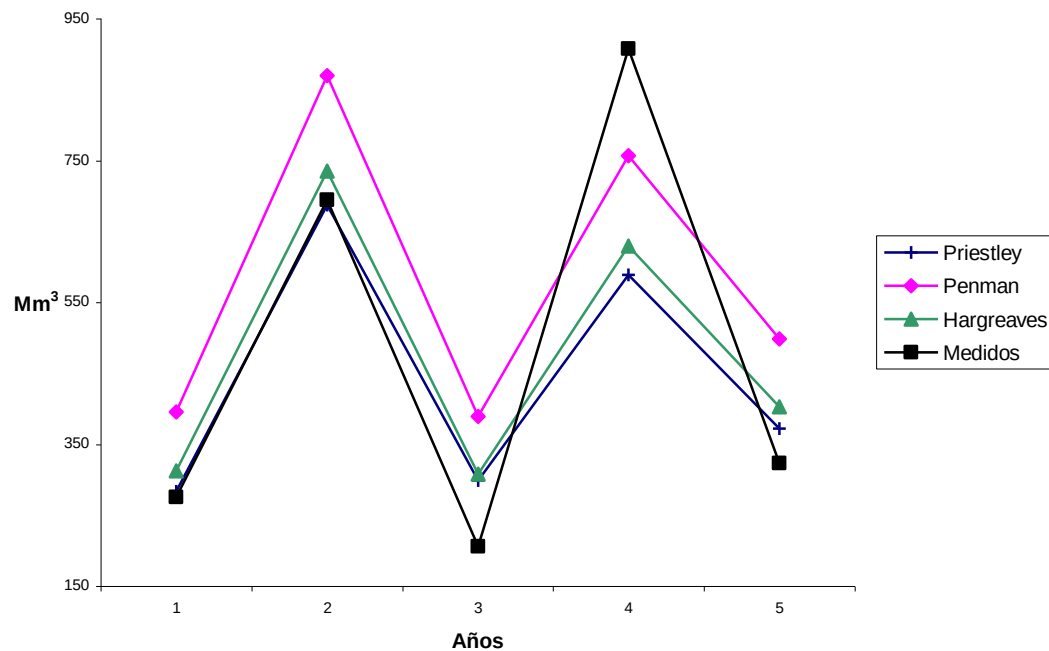


Figura 24. Volumen de escurrimiento anual en millones de metros cúbicos (Mm³) para la cuenca en estudio.

El uso de cualquiera de estos métodos para simular la evapotranspiración depende básicamente de la información disponible del usuario, lo cual impactará positiva y/o negativamente el cambio de escurrimiento.

Calibración del modelo

La calibración es un paso de suma importancia después de haber corrido los datos en el modelo y antes de analizar los resultados generados por el mismo, refiriéndonos principalmente a balance hídrico y pérdida de suelo. Los datos que permiten esta calibración corresponden al gasto del escurrimiento en m^3s^{-1} en la salida de la cuenca o en su defecto en alguno de los subdrenajes para corroborar los datos de caudales generados por el modelo, y de esta manera poder ajustar los datos de entrada al modelo lo mas cercano a la realidad. Sabemos que un modelo trata de responder por medio de transformaciones de parámetros cuantificables lo que sucede en la realidad, por lo tanto, no es probable llegar a un ajuste al 100%, pero si debemos tratar que éste represente de una manera confiable los procesos en la cuenca hidrográfica.

Para este proceso fue necesario hacer una calibración para cada tipo de vegetación y para cada tamaño de subdrenajes seleccionados, esto debido a que el proceso hidrológico se genera de manera independiente por las características antes mencionadas en SWAT, además en cada configuración fue necesario modificar parámetros para adecuar los datos de escurrimiento modelado a los datos de escurrimiento medido en la estación hidrométrica.

Los parámetros que se ajustaron en las diferentes calibraciones fueron curva numérica, grupo hidrológico y conductividad hidráulica.

Las configuraciones utilizadas fueron las siguientes:

Tabla 5. Configuraciones para calibrar la Cuenca del Río Sextín.

Calibración	Vegetación	Tamaño de subdrenajes	Periodo de clima
1	1976	12,500.00	1975 - 1979
2	1976	25,000.00	1975 - 1979
3	1976	75,000.00	1975 - 1979
4	1993	12,500.00	1981 - 1985
5	1993	25,000.00	1981 - 1985
6	1993	75,000.00	1981 - 1985

El arreglo geométrico con mayor modificación correspondió al de mayor tamaño de subcuenca.

Validación del modelo

Para la validación se conservaron los mismos datos que en la calibración y únicamente se modificaron los datos correspondientes al periodo climático que en el caso de la vegetación de 1976 (Serie I) se validó con el periodo 1981-1985 y la vegetación de 1993 (Serie II) se validó con el periodo 1991-1995. Este último proceso nos permite comprobar si la calibración se ajustó a la serie de vegetación a utilizar y que grado de confiabilidad tienen los datos obtenidos.

Tabla 6. Configuraciones para validar la Cuenca del Río Sextín.

Validación	Vegetación	Tamaño de subdrenajes	Periodo de clima
1	1976	12,500.00	1981 - 1985
2	1976	25,000.00	1981 - 1985
3	1976	75,000.00	1981 - 1985
4	1993	12,500.00	1991 - 1995
5	1993	25,000.00	1991 - 1995
6	1993	75,000.00	1991 - 1995

Los resultados obtenidos en cada una de las modelaciones con SWAT fueron analizados estadísticamente utilizando el paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS®) para obtener una relación de la variación entre datos observados y simulaciones por medio de un análisis de regresión. Además se obtuvo el coeficiente de Nash-Sutcliffe explicado en el Capítulo II.

Los registros utilizados en este estudio corresponden a volumen (m^3) y gasto (m^3s^{-1}) medidos en la estación hidrométrica “Sardinas” número de control 36171 dentro de la cuenca del Río Sextín ubicada en el municipio San Bernardo perteneciendo a la CONAGUA con coordenadas geográficas $25^{\circ}14'$ latitud norte y $105^{\circ}27'30''$ longitud oeste que cuenta con un registro diario con periodos iguales a los utilizados para las bases de datos climáticas (1975-1979, 1981-1985 y 1991-1995) que se ingresaron en el modelo y que permitieron calibrarlo y validarlo respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CALIBRACIÓN

Para efectuar la calibración se utilizó la base de datos climática, del periodo de 1975 a 1979, que incluye datos de precipitación, radiación solar y temperaturas máximas-mínimas. Se utilizó el método propuesto por Priestley-Taylor para calcular la evapotranspiración. Se practicaron 3 tamaños de arreglos geométricos para la simulación de escurrimiento, siendo estos de 12500, 25000 y 75,000 ha (a partir de ahora M1, M2 y M3 respectivamente, Figura 26). El tamaño de las subcuencas fue seleccionado en relación al porcentaje de la cuenca quedando de esta forma:

M1 = 2.5% de la cuenca de estudio

M2 = 5.0% de la cuenca de estudio

M3 = 15.0% de la cuenca de estudio

Se considera de gran importancia el uso de diferentes tamaños de subcuencas (Jones *et al.*, 1977; Logan, 1979; Gburek y Sharpley, 1998; y Calhoun *et al.*, 2002) para el cálculo del escurrimiento debido a que una de las características principales del modelo SWAT es la facilidad que tiene para elegir el tamaño de subcuencas (ha), además cada arreglo geométrico de las subcuencas representa de manera diferente el balance hidrológico, esto es debido a que el modelo se basa principalmente en el tipo y el uso de suelo predominante en la subcuenca y a partir de éste se calculan las variables de salida.

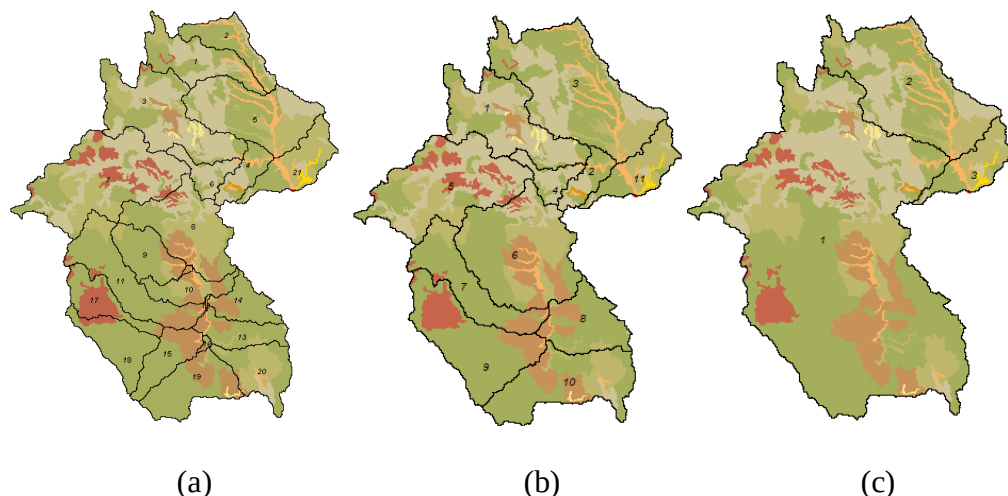


Figura 25. Tamaños de elementos geométricos generados por el modelo para M1 (a), M2 (b) y M3 (c).

Tabla 7. Características de las divisiones en elementos geométricos de la cuenca del Río Sextín

Modelo	% de tamaño de Subcuencas	Tamaño de Subcuencas (ha)	Subcuencas Generados
M1	2.50	12,500.00	21
M2	5.00	25,000.00	11
M3	15.00	75,000.00	3

*En el Anexo 1 se presentan con mayor detalle las características de las cuencas.

Debido a que cada arreglo geométrico genera datos independientes es necesario calibrarlos por separado. Tomando como referencia los trabajos de Jasso (1998) y Di Luzio (2002), en un análisis de sensibilidad sobre el modelo, los parámetros que se ajustaron en M1 y M3 fueron curva numérica, grupo hidrológico y conductividad hidráulica para su calibración, mientras que para M2 fue curva numérica y grupo hidrológico.

En las siguientes figuras se muestran los datos de salida que generó el modelo SWAT para la variable escurrimiento en base al periodo climático ingresado, tomando en cuenta que para la serie I fue de 1975 a 1979 y para la serie II de 1981 a 1985.

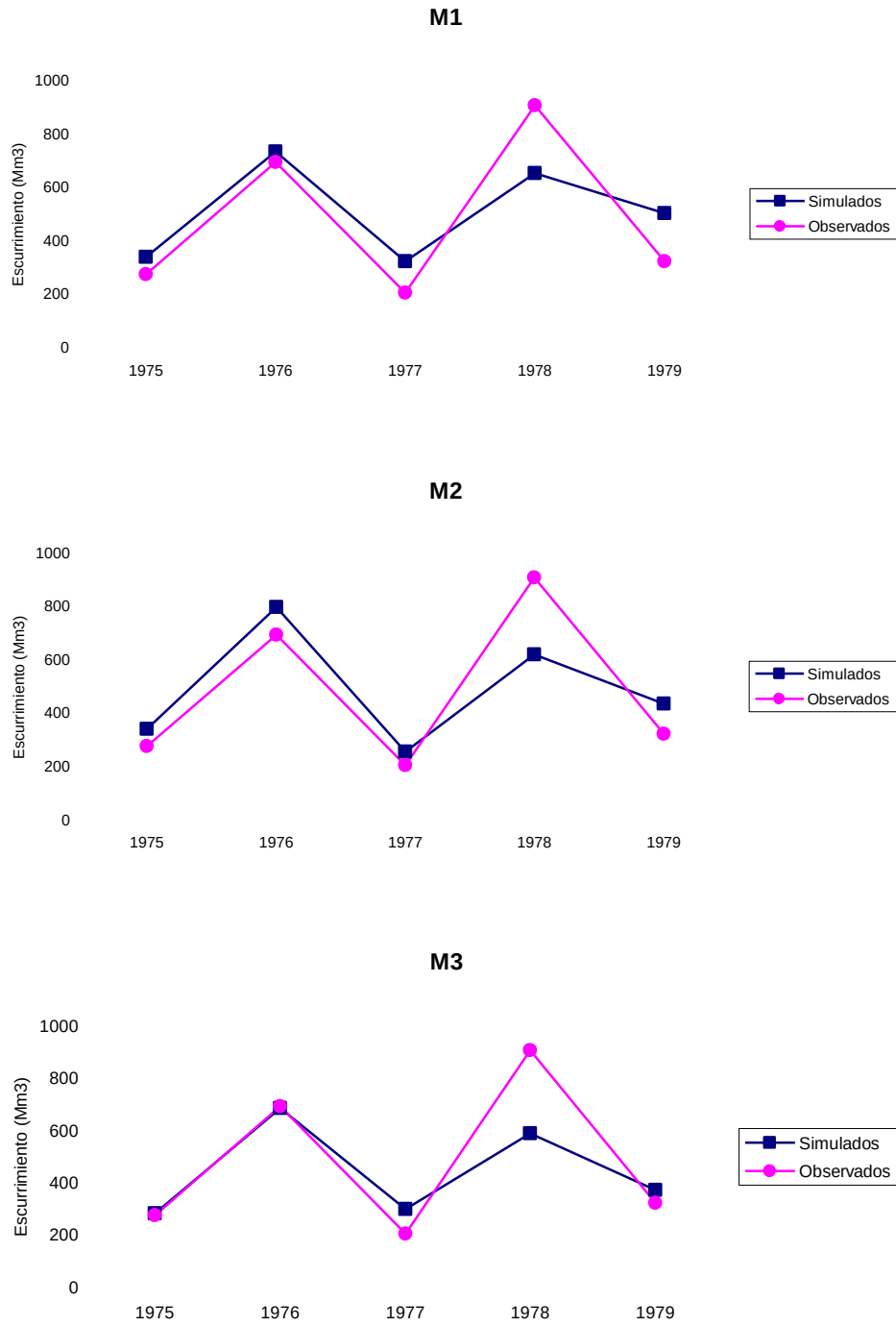


Figura 26. Volumen de escurrimiento anual en millones de m³ (Mm³) para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en calibración de la vegetación de 1976 (Serie I).

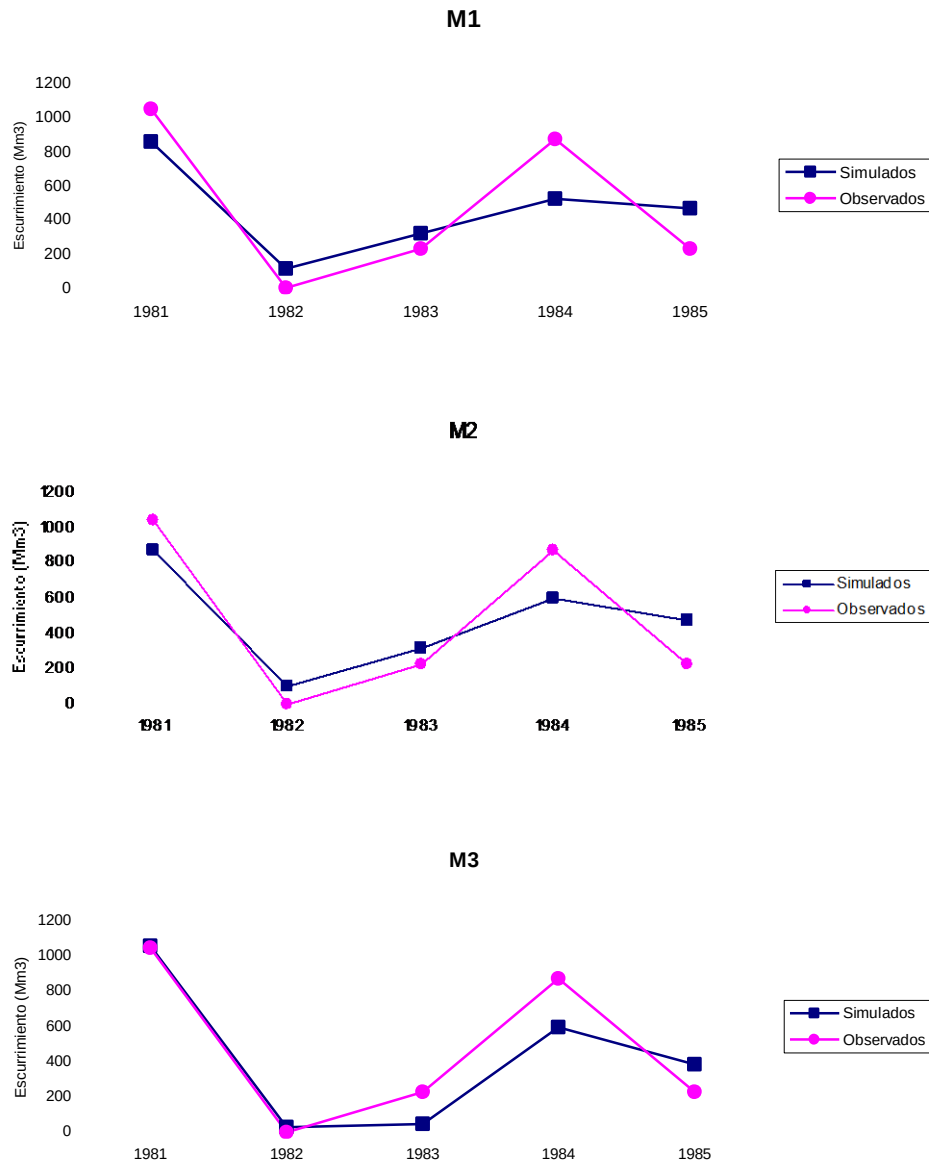


Figura 27. Volumen de escurrimiento anual en Mm³ para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en calibración de la vegetación de 1993 (Serie II).

Para comparar los datos obtenidos con los datos medidos por la estación Sardinas se calculó el coeficiente de Nash-Sutcliffe y se realizó una regresión sobre los volúmenes anuales obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 8. Resultados de calibración de la vegetación de 1976.

Subcuenca		M1		M2		M3	
Prueba	Datos	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
Coeficiente de Nash-Sutcliffe		0.69		0.69		0.70	
R ² de regresión Relación 1:1		0.7716		0.71		0.8007	

Tabla 9. Resultados de calibración de la vegetación de 1993.

Subcuenca		M1		M2		M3	
Prueba	Datos	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
Coeficiente de Nash-Sutcliffe		0.72		0.78		0.84	
R ² de regresión Relación 1:1		0.8072		0.8683		0.8533	

De acuerdo a los resultados presentados del coeficiente Nash-Sutcliffe, el arreglo geométrico que explica mejor los datos observados es el M3, en ambas series de vegetación, esto, debido a que presenta menor complejidad en el ajuste de parámetros para su calibración ya que éste cuenta con 3 subcuencas mientras que en M1 se generan 21, implicando ésto un mayor esfuerzo en la calibración debido a que la propagación del error en los cálculos de escurrimiento es mayor por el número de subcuencas generadas, aún cuando la información que se genera en M1 es más específica por ser generadas para una superficie más pequeña, quizá se requiere mayor número de estaciones climáticas para mayor número de elementos geométricos. Según dicho coeficiente el uso de datos simulados es mejor que el uso de la media aritmética para ambas calibraciones. La regresión por su parte nos explica a que porcentaje los datos simulados explican los datos observados en relación 1:1 por ejemplo en M3 = 80.07 % para la vegetación de 1976 (Anexo 2).

VALIDACIÓN

Una vez calibrados los modelos generados se validó usando datos de clima de un periodo diferente de tiempo (1981-1985 para Serie I y 1991-1995 para Serie II) sin modificación de otro parámetro obteniéndose lo siguiente:

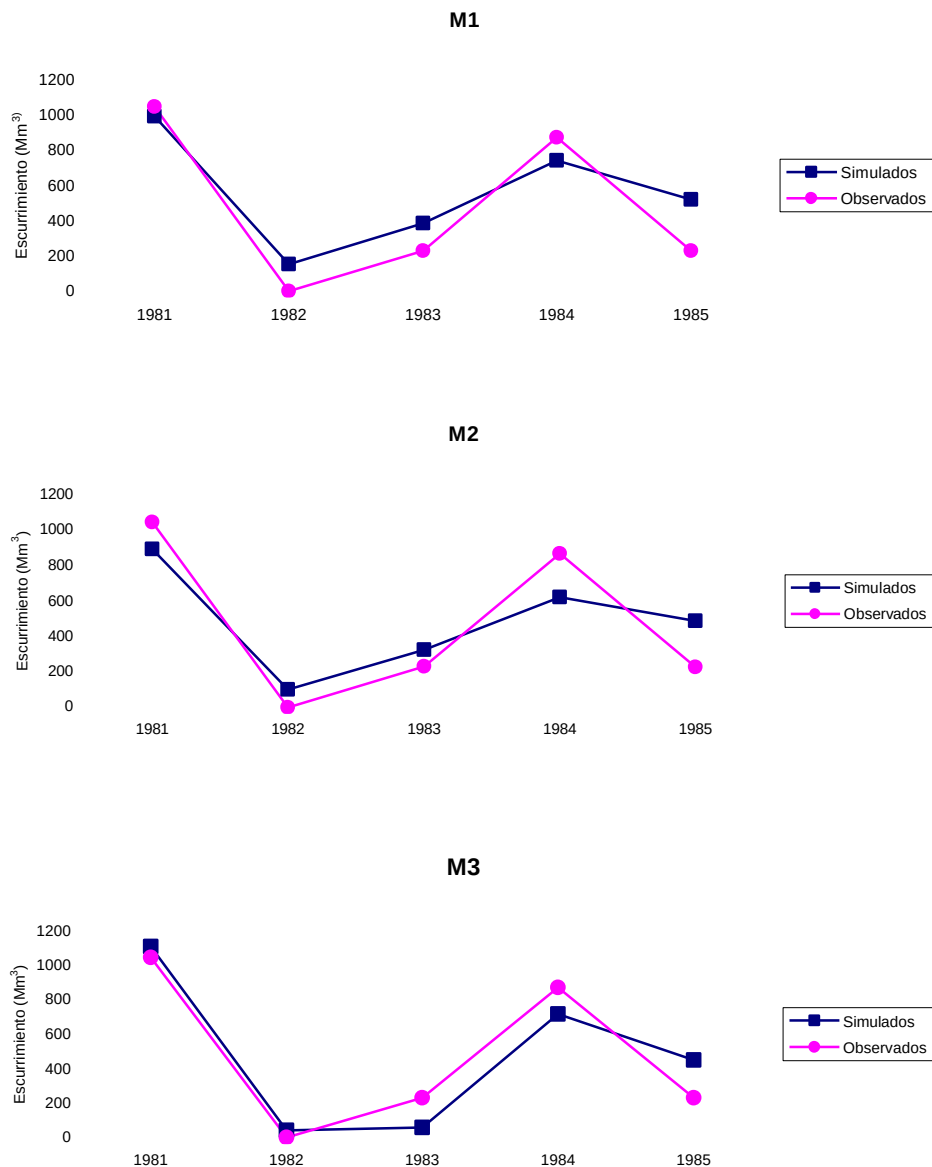


Figura 28. Volumen de escurrimiento anual en Mm³ para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en validación de la vegetación de 1976 (Serie I).

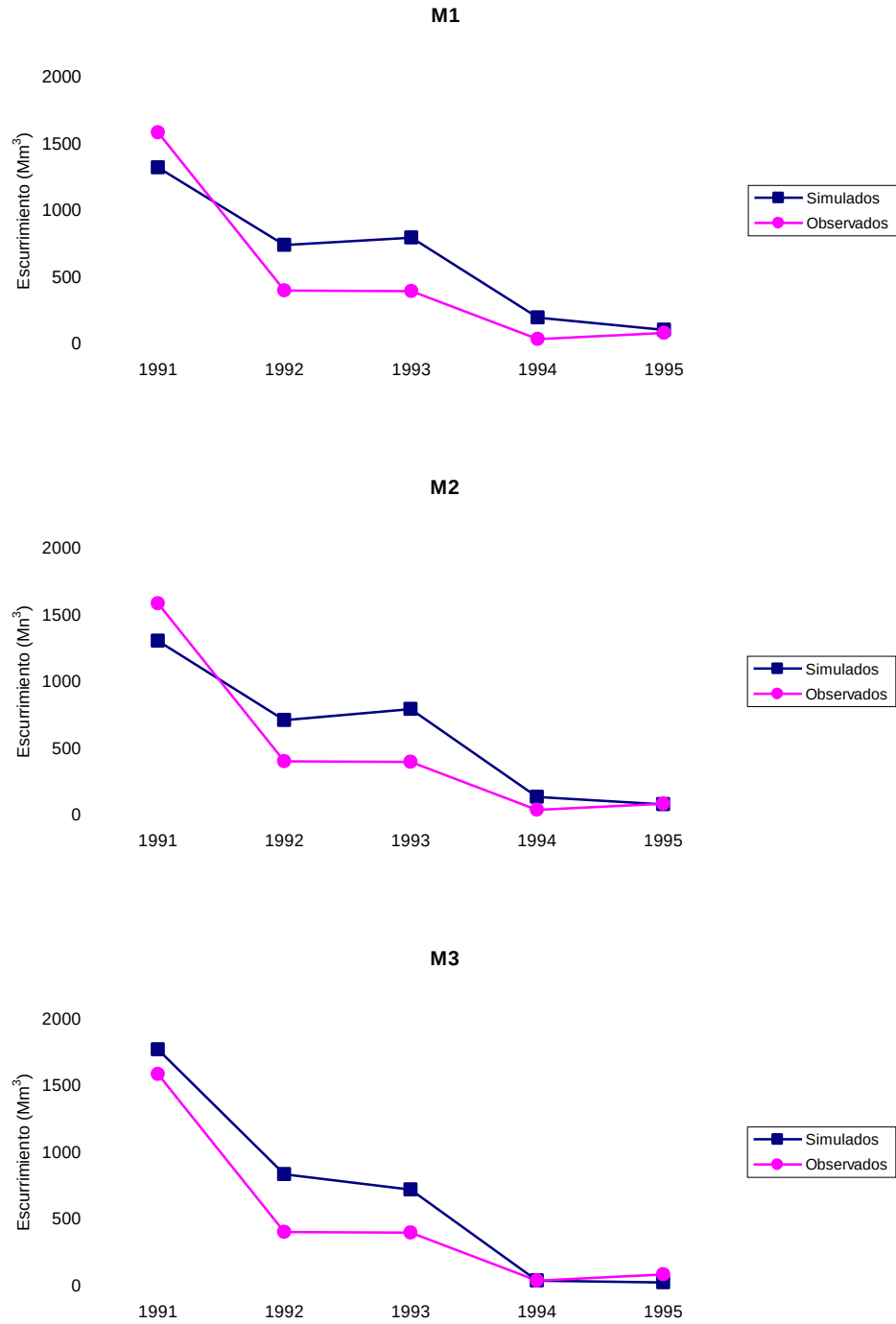


Figura 29. Volumen de escurrimiento anual en Mm³ para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en validación de la vegetación de 1993 (Serie II).

A los datos obtenidos se les calculó el coeficiente de Nash-Sutcliffe sobre los volúmenes anuales para determinar la diferencia con los datos medidos obteniéndose lo siguiente:

Tabla 10. Resultados de validación de la vegetación de 1976.

Subcuenca		M1		M2		M3	
Prueba	Datos	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
Coeficiente de Nash-Sutcliffe		0.82		0.79		0.87	
R ² de regresión Relación 1:1		0.9207		0.869		0.8743	

Tabla 11. Resultados de validación de la vegetación de 1993.

Subcuenca		M1		M2		M3	
Prueba	Datos	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
Coeficiente de Nash-Sutcliffe		.77		.79		.79	
R ² de regresión Relación 1:1		.8401		.8308		.9237	

Se observa una tendencia similar en la validación respecto a la calibración, solamente se presenta una variación en la vegetación de 1976, la cual, al momento de validarla en el periodo de 1981 a 1985 para M1 incrementó su coeficiente de determinación respecto a M2, lo cual pudo ser debido a que los datos ingresados al modelo SWAT para estas condiciones específicas sean lo mas cercanos a la realidad. De acuerdo al coeficiente de Nash-Sutcliffe el uso de datos simulados es mejor que el uso de la media de los observados para ambas series de vegetación. La regresión por su parte nos explica a que porcentaje los datos simulados explican los datos medidos siendo por ejemplo en M2 = 83.08 % para la vegetación de 1993.

ESCURRIMIENTO EN FUNCION DE LA VEGETACIÓN

Una vez validado el modelo SWAT para el área de estudio se compararon las configuraciones realizadas sobre la cuenca del Río Sextín para determinar cual de ellas explica mejor los datos observados. En las siguientes gráficas podemos observar la diferencia que existe para las simulaciones realizadas utilizando en el modelo la vegetación de 1976 y la serie climática de 1975-1979.

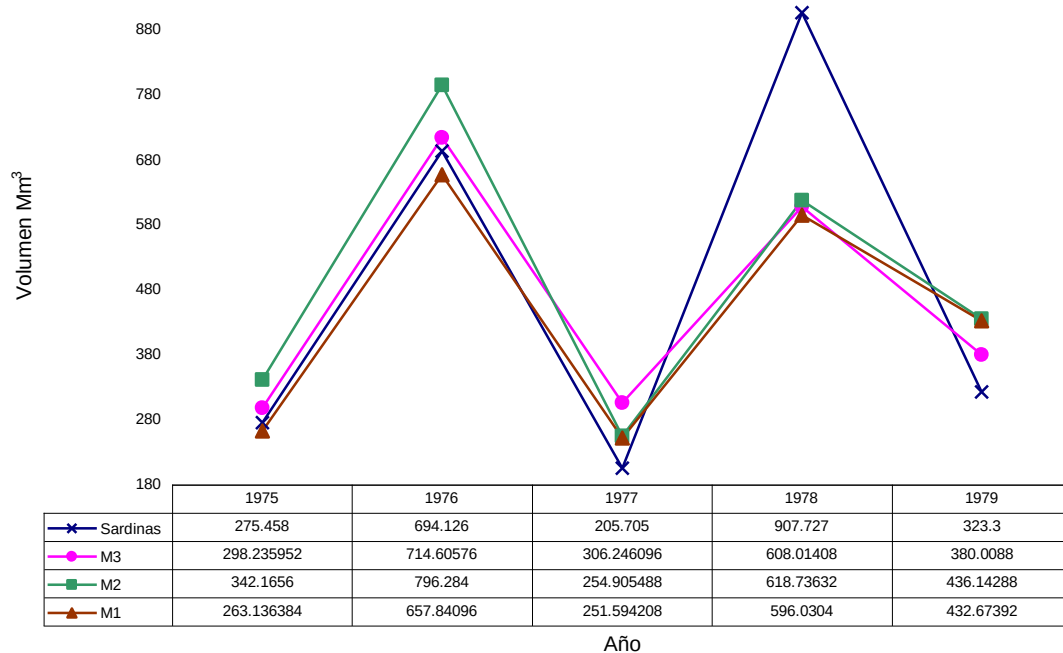


Figura 30. Volumen de escurrimiento anual en Mm³ para comparar valores observados y los simulados en M1, M2 y M3 (Serie I).

Se puede observar en la gráfica que las diferentes configuraciones arrojaron datos similares en respuesta del modelo al escurrimiento de la cuenca hasta la estación Sardinas, sin embargo, el modelo presenta la capacidad de subdividir en mayor numero de subcuencas una cuenca lo cual nos permite una mayor aproximación hacia los datos

de escurrimiento observado, esto es debido a que el modelo toma como parámetros principales para generar las Unidades de Respuesta Hidrológica (características principales de las subcuencas) a los tipos de suelo y uso de suelo con mayor superficie dentro de éstas y sabiendo que existen en el área de estudio coberturas vegetales predominantes también se debe considerar que no son las únicas y por lo mismo a mayor número de subcuencas mejor detalle de cada balance dentro de las subcuencas se tendría.

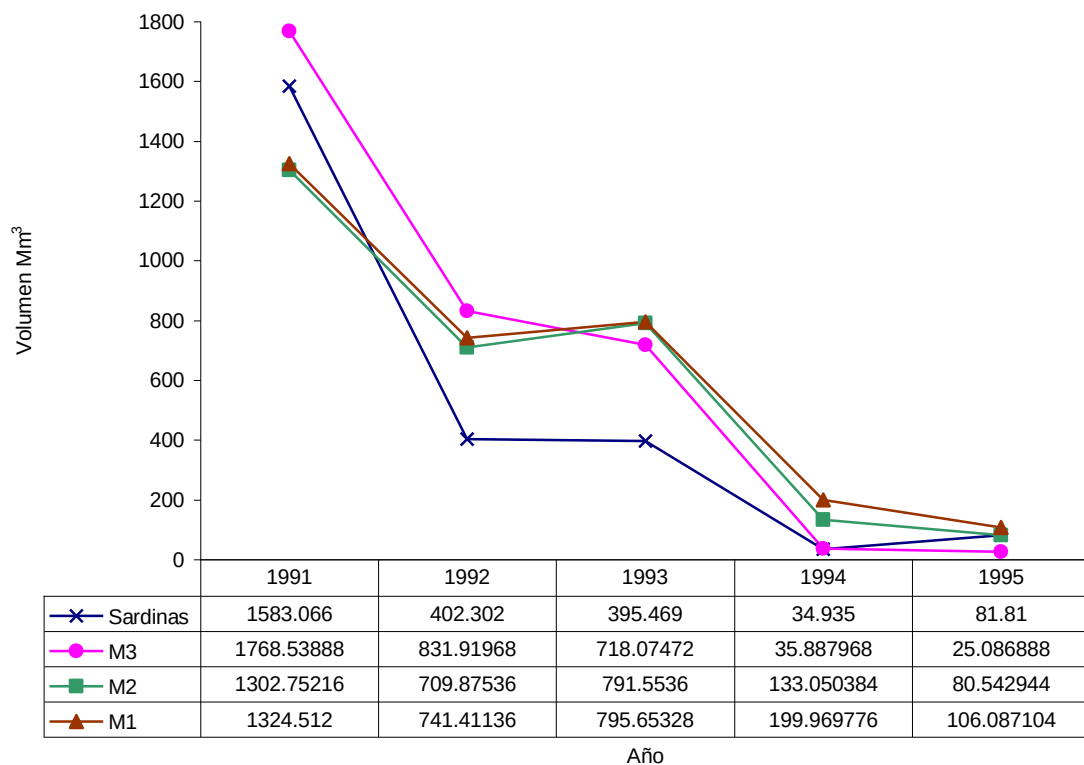


Figura 31. Volumen de escurrimiento anual en Mm^3 para comparar valores observados y los simulados en M3, M2 y M1 (Serie II).

De la misma forma, en la Serie II los resultados de escurrimiento generados por SWAT se agruparon de manera similar sin manifestar mayor variación entre los

diferentes tamaños de subcuenca. Cabe destacar la forma en que se sobreestiman los resultados de las simulaciones en SWAT, al respecto Mendoza y colaboradores (2003) atribuyen esto a la variabilidad de coberturas vegetales y la composición geológica que no comparten en un 100% las características especificadas por el modelo, aún así la sobreestimación no se encuentra fuera de un rango aceptable para la simulación escurrimiento por medio de modelos hidrológicos (mayor al 50%)

Representación en los diferentes tamaños de subcuenca

El uso de SIG's para la ejecución de un modelo hidrológico permite ver gráficamente los temas generados en base a los datos de entrada como es el caso de la precipitación como se observa en la Figura 32.

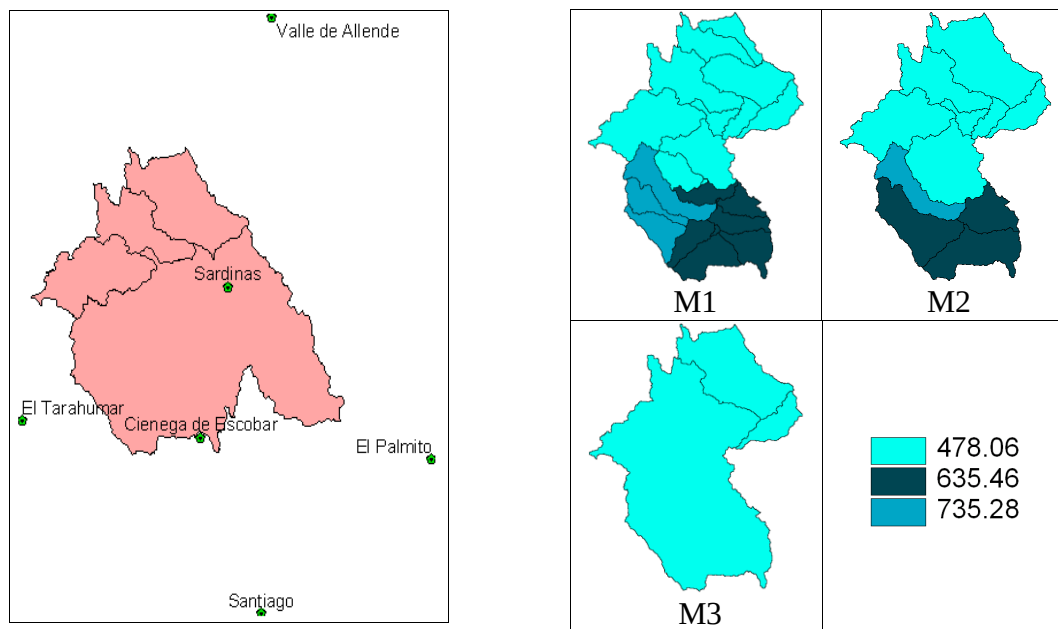


Figura 32. Estaciones climatológicas y distribución de la precipitación (mm) de acuerdo al modelo SWAT en los diferentes arreglos geométricos.

Podemos observar que a medida en que se generan mayor número de subcuencas la precipitación es mas específica para cada una de ellas. En este caso de M3 en donde se generaron 3 subcuencas únicamente se utilizaron los datos de la estación meteorológica “Sardinas”, en contraste, para M1 se generaron 21 cuencas y se utilizaron 3 estaciones meteorológicas “Sardinas”, “Ciénega de Escobar” y “El Tarahumar” y se puede observar también que para M2 se utilizaron las mismas estaciones que en M1. Esto debido a la interpolación que genera el SWAT para determinar cual estación es la mas cercana a la subcuenca generada, de ahí la importancia de contar con el mayor número de datos en cuanto a estaciones meteorológicas para de esta manera obtener resultados con mayor cercanía a la realidad.

Por otra parte, en base a los datos de entrada y a las características de suelo y uso de suelo y vegetación, SWAT generará las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) las cuales son independientes entre si pues estan comprendidas por características específicas de cada una y delimitadas como subcuencas (el anexo 1 presenta las características de los datos generados en la calibración y validación en cada tamaño de cuenca M1, M2 y M3). A continuación se muestran los datos de escurrimiento generados para los diferentes arreglos geométricos.

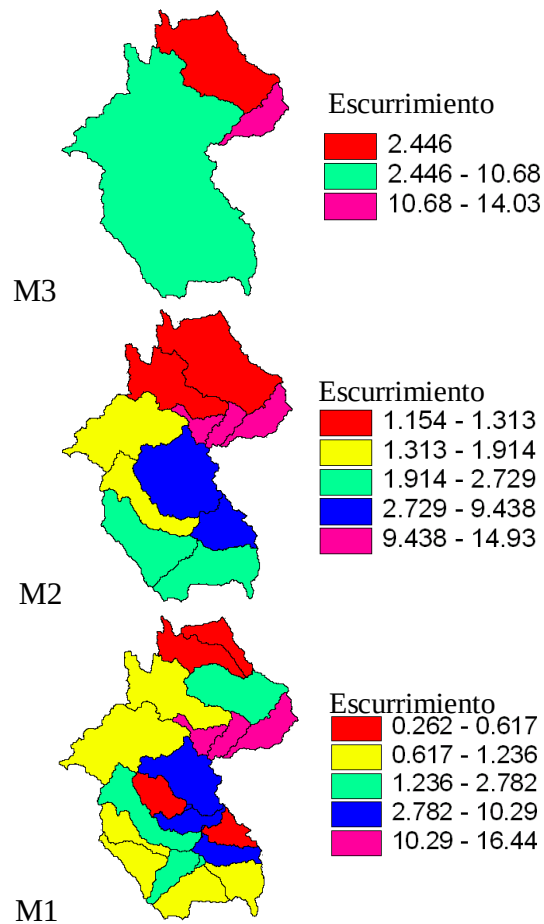


Figura 33. Escurrimiento modelado (m^3s^{-1}) con SWAT en los diferentes tamaños de subcuencas en base a los datos de clima ingresados.

Como se explicó anteriormente cada tamaño de cuenca corresponde a características independientes y esto se ve reflejado en la generación de los datos de escurrimiento como se muestra en la Figura anterior, cabe destacar que los flujos son acumulados, y por tal motivo en la parte baja se encuentra el el mayor escurrimiento debido a que es la salida de la cuenca.

Comparación de escurrimiento de Serie I y Serie II

Las Tablas 12 y 13 nos muestran los parámetros simulados por el modelo SWAT en base a los datos ingresados de las características de la cuenca. Dichos parámetros no

son los únicos que genera SWAT, sin embargo para este estudio son los necesarios para explicar las diferencias en el proceso hidrológico con la vegetación de 1976 y 1993 para la cuenca en estudio.

Para poder realizar la comparación de la diferencia en el escurrimiento en la cuenca fue necesario primero correr los datos de las dos capas de vegetación (Serie I y Serie II) en una misma configuración, en este caso con el periodo de clima 1975-1979 y tamaño de 750 ha para los arreglos geométricos para ambas vegetaciones. A continuación se presentan los datos de salida generados por el SWAT para ambos periodos de vegetación.

Tabla 12. Datos de salida estimados del modelo SWAT para la vegetación de 1976 (Serie I) usando el periodo de clima de 1975-1979.

Año	Precipitación	ETP actual	Percolación	Escurrimiento	Producción de agua	Producción de sedimentos
	mm	mm	mm	mm	mm	Ton ha ⁻¹
1975	399.500	283.585	20.884	0.848	17.803	0.095
1976	578.300	441.240	121.222	3.850	107.916	0.007
1977	427.900	414.834	27.125	2.491	30.098	0.001
1978	547.800	437.025	101.425	2.230	90.473	0.001
1979	436.800	397.457	42.768	1.170	40.778	0.000
Promedio	478.060	394.828	62.685	2.118	57.413	0.021

Tabla 13. Datos de salida del modelo SWAT para la vegetación de 1993 (Serie II) usando el periodo de clima de 1975-1979.

Año	Precipitación	ETP actual	Percolación	Escurrimiento	Producción de agua	Producción de sedimentos
	mm	mm	mm	mm	mm	Ton ha ⁻¹
1975	399.500	283.399	19.822	2.128	18.184	0.393
1976	578.300	446.875	113.342	6.482	103.467	0.346
1977	427.900	431.107	10.871	2.756	17.680	0.003
1978	547.800	448.358	88.644	4.153	80.665	0.148
1979	436.800	415.412	24.195	1.724	24.793	0.034
Promedio	478.060	405.030	51.375	3.449	48.958	0.185

El efecto estimado provocado por la disminución de la cobertura vegetal, aún cuando es mínimo, se puede observar en los datos generados por el modelo SWAT para el período de 1975 a 1979, tales como el *incremento* en el valor promedio de la evapotranspiración actual de 394.828 mm en 1976 a 478.06 mm en 1993. La lámina de escurrimiento, por su parte, se *incrementó* de 2.118 mm a 3.449 mm, mientras que la producción de agua *disminuyó* de 57.413 mm en 1976 a 48.958 en 1993 en promedio. Se debe considerar que la lámina de escurrimiento solamente es la capa de agua que escurre sobre la superficie del suelo, mientras que la producción de agua es un balance que comprende todas las aportaciones de agua (escurrimiento superficial, escurrimiento lateral, agua subterránea que contribuye al escurrimiento) menos las pérdidas de la misma (extracción de agua y pérdidas de la cama del cauce por transmisión) en la cuenca (Di Luzio *et al.*, 2002).

ESTIMACIÓN DEL CAMBIO DE VEGETACIÓN

La Tabla 14 presenta el cambio del tipo de vegetación resultante de la comparación de la Serie I (1976) y la serie II (1993) de INEGI. En esta se muestra la tasa de cambio que se presentó entre los periodos de estudio basados en la ecuación (19) utilizada por FAO (1996) usada para cálculos de deforestación, la cual expresa el cambio en porcentaje de superficie para cada año dentro del periodo de estudio.

Tabla 14. Cambio de vegetación y tasa de cambio entre Serie I y Serie II de INEGI.

Tipo de Vegetación	sup. (ha) Serie I	%	sup. (ha) Serie II	%	Cambio ha	Cambio %	Tasa de Cambio
Área sin vegetación aparente	1,099.41	0.22	1,248.21	0.25	148.81	0.03	0.74
Cuerpos de agua	0.00	0.00	9.75	0.00	9.75	0.00	100.00
Vegetación de galería	588.50	0.12	667.00	0.13	78.50	0.01	0.73
Bosque de coníferas distintas a pino	429.05	0.09	436.31	0.09	7.26	0.00	0.10
Pastizal inducido	19,346.25	3.89	19,501.79	3.92	155.54	0.03	0.05
Pastizal natural	58,094.51	11.68	55,768.96	11.21	-2,325.55	-0.47	-0.24
Mezquital	28.26	0.01	0.00	0.00	-28.25	-0.01	-100
Chaparral	21,076.18	4.24	24,161.60	4.86	3,085.42	0.62	0.80
Bosque bajo abierto	86,943.92	17.48	89,982.45	18.09	3,038.52	0.61	0.20
Bosque de Pinos	106,916.03	21.50	102,706.12	20.65	-4,209.91	-0.85	-0.24
Bosque de encinos	38,760.72	7.79	38,709.20	7.78	-51.51	-0.01	-0.01
Bosque de Pino-encino	143,264.09	28.81	143,205.84	28.79	-58.25	-0.02	0.00
temporal	19,549.69	3.93	19,640.90	3.95	91.21	0.02	0.03
riego	1,234.01	0.25	1,292.48	0.26	58.47	0.01	0.27
Superficie Total	497,330.61	100.00	497,330.61	100.00			

De manera general se muestra la superficie y el porcentaje respecto al área total de la cuenca (que representaba cada tipo de vegetación en la Serie I (1976) y la Serie II (1993)), así como también la superficie que se modificó entre estas dos fechas y su correspondiente porcentaje de cambio, estos datos tomaron valores positivos o negativos de acuerdo a si fue un incremento en superficie o una disminución de la misma y

finalmente la tasa de cambio representa que porcentaje se modifico en cada tipo de vegetación en base al año anterior, por ejemplo, en el caso de Área sin vegetación aparente el incremento estimado de 1976 a 1977 fue de 0.74% llegando a una superficie de 1107.54 ha, posteriormente el crecimiento de 1977 a 1978 fue de 0.74% (1115.74 ha) y así sucesivamente hasta el año 1992 a 1993 con 1248.21 ha). Esta misma interpretación corresponde a todos los demás tipos de vegetación con excepción de los cuerpos de agua que no había en 1976 y para 1993 ya figuraban con 9.75 ha; también es el caso del mezquital que en el área de estudio había 28.26 Ha en 1976 pero en 1993 ya había desaparecido.

Se pueden observar claramente cuales fueron las coberturas vegetales que presentaron un incremento o disminución de superficie mayor, tal es el caso del Pastizal Natural, Bosque Bajo Abierto y Bosque de Pinos, sin embargo, este cambio no se aprecia en el porcentaje de superficie ni en la tasa de cambio debido a que dichas coberturas son las de mayor extensión superficial en el área de estudio, en contraste, la superficie de Chaparral (aproximadamente 5% del área de estudio) tiene una tasa de deforestación cercana al 1% anual.

Es importante, también, destacar la pérdida del Mezquital y el incremento de las Áreas sin Vegetación Aparente provocando estos un incremento en la intensidad del escurrimiento con un mayor arrastre de partículas como se pudo observar en los resultados del modelo hidrológico SWAT.

Comportamiento de la vegetación

Basándose en la metodología propuesta por Velásquez *et al.* (2002) y esta a su vez en un estudio de cambio de vegetación en toda la República Mexicana se determinó

la ecuación de comportamiento de la vegetación de 1993 respecto a la vegetación de 1976 (Serie I y Serie II respectivamente) como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Comportamiento del cambio de la vegetación entre la Serie I - Serie II y obtención de la ecuación que lo describe.

Tipo de vegetación	Estimación de la tasa de cambio anual (ha)	Ecuación de comportamiento de la vegetación en el periodo de estudio (1976-1993)
Área sin vegetación aparente	8.75	Sup 1976-1993 = $8.75 * 17 + 1,099.41$
Cuerpos de agua	0.57	Sup 1976-1993 = $0.57 * 17 + 0.00$
Vegetación de galería	4.62	Sup 1976-1993 = $4.62 * 17 + 588.50$
Bosque de coníferas distintas a pino	0.43	Sup 1976-1993 = $0.43 * 17 + 429.05$
Pastizal inducido	9.15	Sup 1976-1993 = $9.15 * 17 + 19,346.25$
Pastizal natural	-136.80	Sup 1976-1993 = $-136.80 * 17 + 58,094.51$
Mezquital	-1.66	Sup 1976-1993 = $-1.66 * 17 + 28.26$
Chaparral	181.50	Sup 1976-1993 = $181.50 * 17 + 21,076.18$
Bosque bajo abierto	178.74	Sup 1976-1993 = $178.74 * 17 + 86,943.92$
Bosque de Pinos	-247.64	Sup 1976-1993 = $-247.64 * 17 + 106,916.03$
Bosque de encinos	-3.03	Sup 1976-1993 = $-3.03 * 17 + 38,760.72$
Bosque de Pino-encino	-3.43	Sup 1976-1993 = $-3.43 * 17 + 143,264.09$
Agricultura de temporal	5.37	Sup 1976-1993 = $5.37 * 17 + 19,549.69$
Agricultura de riego	3.44	Sup 1976-1993 = $3.44 * 17 + 1,234.01$

Esta información nos permite conocer cuantas hectáreas aumentaron o disminuyeron los diferentes tipos de vegetación en promedio por año durante el periodo de 1976 a 1993. Como ejemplo el pastizal natural, con una tasa de cambio estimada de 136.8 ha perdidas (signo negativo) anualmente en 17 años y en el caso de la vegetación de galería el incremento de 4.62 ha anuales en el mismo periodo. La ecuación de comportamiento de la vegetación es una forma de linealizar la pérdida o incremento de la vegetación y es válida únicamente para el periodo de estudio. Se formó con la tasa de cambio anual multiplicada por el número de años de estudio (constante de 17 años para todos los casos) sumando la superficie inicial de 1976 (Serie I) siendo esto igual a la superficie de 1993 (Serie II).

En la Tabla 16 se muestra el cambio que hubo de vegetación entre cada una de las categorías de tipo de vegetación que se consideraron con la finalidad de definir la superficie de vegetación modificada y determinar hacia que tipo de vegetación fue dicho cambio. Para esta Tabla, la vegetación base fue la Serie I (1976) y su cambio con la Serie II (1993), es decir, se determinó que cambio ocurrió de la vegetación de 1976 en comparación con la vegetación de 1993.

Tabla 16. Cambio de vegetación entre Serie I y Serie II de INEGI por categorías de vegetación (ha).

		Vegetación 1993 (ha)												
		ar	asva	at	bba	bcdp	be	bp	bpe	ca	ch	pi	pn	vg
Vegetación 1976 (ha)	ar	1,051.34	27.70	75.55	5.99	x	x	x	x	x	x	36.97	24.18	12.29
	asva	2.29	999.87	55.55	x	x	x	x	x	x	x	x	41.70	0.00
	at	141.21	135.80	15,495.22	411.98	x	x	432.37	1831.00	7.15	87.96	840.11	33.58	133.31
	bba	10.76	x	513.45	82839.91	x	282.17	147.20	1512.37	x	38.63	554.15	1035.81	9.50
	bcdp	x	x	x	x	420.38	x	6.09	2.58	x	x	x	x	x
	be	x	x	82.13	161.58	x	37243.42	131.79	444.76	x	36.14	65.70	595.19	x
	bp	x	x	1544.42	134.34	15.92	134.91	99184.49	2456.36	x	2826.21	618.14	1.24	x
	bpe	x	x	860.17	3787.87	x	383.39	1870.37	132309.24	2.60	2743.22	1289.19	18.04	x
	mesq	x	x	x	0.10	x	x	x	x	0.00	x	28.16	x	x
	ch	x	x	251.20	22.76	x	3.37	444.75	1924.66	x	18429.45	x	x	x
	pi	9.87	x	484.62	803.92	x	x	482.33	1407.05	x	x	16151.03	7.44	x
	pn	57.78	81.87	535.77	1809.31	x	564.15	6.74	1317.80	x	x	0.13	53693.41	27.54
vg	19.19	2.93	58.94	4.70	x	x	x	x	x	x	x	18.38	484.36	

Se puede observar que los números remarcados representan aquellas superficies de vegetación que no sugrieron cambio en el periodo de estudio.

De acuerdo a los cambios presentados en la comparación entre la Serie I y Serie II se determinaron las categorías de los mismos de acuerdo al modelo de cambio por procesos de deforestación generado por el Instituto de geografía de la UNAM (Velásquez *et al.*, 2002) obteniéndose la siguiente matriz de cambios (Tabla 17).

Tabla 17. Cambio de vegetación según el modelo de estimación del proceso de deforestación entre Serie I y Serie II de INEGI por categorías de vegetación.

		1997 ha												
ha 1976		ar	asva	at	bba	bcdp	be	bp	bpe	ca	ch	pi	pn	vg
	ar	X	1	0	6	X	X	X	X	X	X	0	0	6
	asva	1	X	1	X	X	X	X	X	X	X	X	6	6
	at	0	1	X	6	X	X	6	6	1	6	0	0	6
	bba	5	X	5	X	X	2	2	2	X	1	5	5	3
	bcdp	X	X	X	X	X	X	3	3	X	X	X	X	X
	be	X	X	5	1	X	X	3	1	X	1	5	5	X
	bp	X	X	5	1	3	3	X	1	X	1	5	5	X
	bpe	X	X	5	1	X	2	2	X	1	1	5	5	X
	mesq	X	X	X	3	X	X	X	X	X	X	4	X	X
	ch	X	X	5	2	X	2	2	2	X	X	X	X	X
	pi	0	X	0	6	X	X	6	6	X	X	X		X
	pn	0	1	0	6	X	6	6	6	X	X	0	X	0
	vg	4	5	4	3	X	X	X	X	X	X	X	4	X
1=Alteración							4=Otros procesos de degradación							
2=Sucesión secundaria							5=Deforestación							
3=Falso cambio							6=Regeneración							

Este análisis está dirigido a diferenciar los cambios de vegetación presumiblemente provocados por actividades humanas hacia las coberturas vegetales existentes, se pueden considerar cambios favorables los correspondientes a las categorías 2 y 6, y cambios desfavorables en las categorías 1, 4 y 5. Tomando en cuenta esto, si se concentran las superficies resulta mayor la correspondiente a cambios desfavorables con 20,509.26 ha respecto a 15,938.94 ha de cambios favorables hacia la vegetación. Se debe tomar en cuenta además que dentro de los cambios desfavorables, estos en su mayoría son procesos de alteración y deforestación, es decir, que no son procesos reversibles a corto o mediano plazo y que tienden a la degradación del medio ambiente. Una de las categorías que no correspondieron a ninguno de los cambios anteriores es el falso cambio que pudo ser causa de confusión en la asignación de categoría de la Serie II

o en la digitalización de la Serie I con 305.59 ha y finalmente este análisis agregó la categoría cero para considerar en ella a las coberturas vegetales que se modificaran dentro de la misma actividad como es el caso de las actividades humanas (ejemplo: cambio de agricultura de riego a agricultura de temporal) con 2,274.75 ha.

Del mismo modo que se obtuvo la matriz anterior se presenta la Tabla 18 que muestra los cambios debido a los impactos por procesos o actividades agropecuarias en la comparación del cambio de uso de suelo entre la Serie I y Serie II.

Tabla 18. Cambio de vegetación según el modelo de estimación del proceso de impacto pecuario entre Serie I y Serie II de INEGI por categorías de vegetación.

		1993 ha												
ha 1976		ar	asva	at	bba	bcdp	be	bp	bpe	ca	ch	pi	pn	vg
	ar	X	1	0	8	X	X	X	X	X	X	6	6	8
	asva	1	X	1	X	X	X	X	X	X	X	X	8	8
	at	0	1	X	8	X	X	8	8	1	8	6	6	8
	bba	5	X	5	X	X	0	0	0	X	0	7	7	3
	bcdp	X	X	X	X	X	X	0	0	X	X	X	X	X
	be	X	X	5	0	X	X	0	0	X	0	7	7	X
	bp	X	X	5	0	3	0	X	0	X	0	7	7	X
	bpe	X	X	5	0	X	0	0	X	0	0	7	7	X
	mesq	X	X	X	3	X	X	X	X	X	X	7	X	X
	ch	X	X	5	0	X	0	0	0	X	X	X	X	X
	pi	4	X	4	8	X	X	8	8	X	X	X	0	X
	pn	4	4	4	8	X	8	8	8	X	X	0	X	8
	vg	4	4	4	3	X	X	X	X	X	X	X	6	X
1=Alteración 2=Sucesión secundaria 3=Falso cambio 4=Procesos de degradación por cobertura antrópica							5=Deforestación por cobertura antrópica 6=Degradación por ganadería 7= Deforestación por ganadería 8= Regeneración							

En este análisis se relacionó el efecto de la ganadería sobre los cambios de cobertura vegetal, al igual que en el análisis anterior se puede asignar una agrupación de valores para cambios favorables (categorías 2 y 8) y cambios desfavorables (categorías

1, 4, 5, 6 y 7) obteniéndose 9,375.44 ha de superficie en cambios favorables y 9,900.43 ha de cambios desfavorables. La superficie de errores de cambio es igual a la obtenida anteriormente (305.59 ha) y la categoría 0, es decir, sin cambio de categorías respecto al modelo usado tuvo una superficie de 19,447.08 ha.

Lo anterior nos permite realizar una comparación entre los resultados de ambos modelos (deforestación e impacto pecuario) siendo mayor el cambio de cobertura vegetal generado por la deforestación con 20,509.26 ha en comparación a los generados por la ganadería con 9,375.44 ha.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El modelo SWAT creado por el USDA –ARS presenta eficiencia alta de acuerdo al coeficiente de Nash – Sutcliffe (R^2) las cuales se sitúan entre 0.69 y 0.87 para las diferentes configuraciones geométricas.
- A menor número de arreglos geométricos o mayor tamaño de estos se obtiene una mayor eficiencia del modelo para representar procesos hidrológicos como lo es el escurrimiento superficial.
- Las coberturas vegetales en el área de estudio con mayor cambio con respecto al tiempo son Bosque de pinos y Pastizal natural con un decremento estimado de 247.67 y 136.8 ha año⁻¹ respectivamente mientras que las coberturas que crecieron fueron a su vez Chaparral y Bosque Bajo Abierto con un incremento estimado de 181.50 y 178.74 ha año⁻¹ respectivamente.
- El cambio de vegetación en el área de estudio se influenció en mayor proporción por deforestación en comparación con el cambio de cobertura vegetal generado por ganadería.
- El uso de un Sistema de Información Geográfica para el desarrollo de un modelo hidrológico es una herramienta que nos permite ver la información generada por esta última en una forma más sencilla a manera de mapas temáticos y de esta manera explicar gráficamente el comportamiento dentro de una cuenca y la información que ahí se genera.

- El cambio de vegetación afecta negativamente la producción de agua en aproximadamente 14% lo que representa para esta cuenca 42.05 Mm³ anuales. También, los valores de acumulación de sedimentos se incrementan en 0.164 Ton ha⁻¹ año⁻¹ en promedio (780%). Lo anterior demuestra que el cambio de vegetación afecta de manera negativa la calidad de agua así como también la producción de la misma.

RECOMENDACIONES

- Para el uso de modelos de simulación es necesario crear un sistema de captura de datos climáticos más efectivo en comparación con el que se usa actualmente, esto debido a que no se cuenta con una base de datos climática lo suficientemente completa para el adecuado procesamiento de los modelos antes mencionados.
- Para una mejor calibración de los modelos hidrológicos también es necesaria la toma de datos de sedimentos en las estaciones hidrométricas para de esta manera no solo contrastar los datos de escurrimiento sino también los generados en sedimentación.
- Este estudio comprendió el periodo 1976 – 1993 por la disponibilidad de las Series de Vegetación de INE e INEGI correspondientes (I y II), considerándose así como un estudio base para la determinación de cambios de cobertura vegetal y preliminar para el estudio del estado actual de los mismos, por lo tanto, se considera de importancia darle seguimiento a este estudio para determinar cual es la tasa actual de deforestación y pérdidas por ganadería y de esta forma proponer de alguna manera medidas de mitigación.

LITERATURA CITADA

- Arnold, C. L. and C. J. Gibbons, 1996. Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. *J. American Planning Assoc.* 62:243-258.
- Arnold, J. G. and J. R. Williams. 1987. Validation of SWRRB - simulation for water resources in rural basins. *Journal of Water Resources Planning and Management* 113(2):243-256.
- Black, P. E. 1997. Watershed Functions. *Journal of The American Water Resources Association* 33: 1-11.
- 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 204 pp.
- Calhoun, F. G.; Baker, D. B. y Slater B. K. 2002. Soils, water quality, and watershed size: interactions in the Maumee and Sandusky River basins of Northwestern Ohio. *Journal of Environ Quality*. 31: 47 – 53.
- Charbonneau, R., and G.M. Kondolf. 1993. Land use change in California, USA: nonpoint source water quality impacts. *Environ. Man.* 17:453-460.
- Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays, 1988. *Applied Hydrology*, McGraw Hill, New York , N.Y. 572 pp.
- Clarke, R. T., 1998. *Stochastic Processes for Water Scientists: Developments and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., New York. 183 pp.
- Crawford, N. H. and R. K. Linsley. 1966. *Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Stanford University. Technical Report No. 39. 210 pp.
- Descroix, L.; M, Esteves; D. Viramontes; C. Duwig y J. M. Lapetite. 2004. Agua y Espacio en Valle de Bravo: la lucha por el agua. *In: La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada*. Descroix, L.; J. L. González B. y J. Estrada A. (eds.) Ediciones INIFAP –IRD. Gómez Palacio, Durango, México. pp: 273 – 284.
- DeVantier, B. A. and A. D. Feldman. 1993. Review of GIS Applications in Hydrologic Modeling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, (ASCE) 119(2):246-261.
- Di Luzio, M; Srinivasan, R.; J. G. Arnold; and Neitsch, S. L . 2002. *Arc View Interface for SWAT2000. User's Guide*. Temple, Texas. Published 2002 by Texas Water Resources Institute, College Station, Texas. 337 pp.

- Dooge, J. C. I. 1982. Parameterisations of hydrologic processes. *In: Land Surface Processes in Atmospheric General Circulation Models*. Eagleson, P. S. (ed.) University Press. London. pp: 243 – 288.
- Famiglietti, J. S. and E. F. Wood, 1995. Effects of spatial variability and scale on areal-average evapotranspiration. *Water Resources Research*, 31: 699-712.
- FAO, 1996. Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of chain processes. Nr. 130. Rome, Italy. 152 pp.
- Ferreira, V. A.; G. A. Weesies; D. C. Yoder; G. R. Foster; and K. G. Renard. 1995. The site and condition specific nature of sensitivity analysis. *J. Soil and Water Conserv.* 50(5):493-497.
- Fernández, D. S., J. L. Oropeza, M. Martínez, B. Figueroa y O. L. Palacios. 1999. Aplicación del modelo hidrológico SWRRB en la cuenca El Tejocote, Atlacomulco, Estado de México. *Agrociencia* 33: 1-9.
- Franklin, J. F. 1992. Scientific basis for new perspectives in forests and streams. R. J. Naiman (ed.) *Watershed Management*. Springer-Verlag, NY. pp 75-72.
- Gburek, W. J. And A. N. Sharpley. 1998. Hydrolic Controls on phosphorus loss from uplan agricultural watershed. *En Journal of Environ Quality*. 27: 267 – 277.
- Graf, W. L., 1988. *Fluvial Processes in dryland rivers*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany. 246 pp.
- Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1:96-99.
- Hunsaker, C. T., and D. A. Levine. 1995. Hierarchical approaches to the study of water quality in rivers. *BioScience* 45:193-203.
- Hunsaker, C. T., D. A. Levine, S. P. Timmins, B. L. Jackson, and R. V. O'Neill. 1992. Landscape characterization for assessing regional water quality. *In: Ecological indicators*. D.H. McKenzie, D.E. Hyatt, and V.J. McDonald (eds.). Elsevier Appl. Sci., New York. pp. 997-1006
- Hutchinson, M. F. 1989. A New Procedure for Gridding Elevation and Stream Line Data with Automatic Removal of Spurious Pits. *Journal of Hydrology*. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam. 106:211-232.
- INEGI. 1987. Carta de uso de suelo y vegetación: G13-4, G13-5, G13-7 y G13-8. Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México

- INEGI. 1988. Carta de geología. G13-4, G13-5, G13-7 y G13-8. Escala 1:250,000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- Jaramillo, D. F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Colombia. 613 pp.
- Jasso I., R. 1998. Sensitivity of water and sediment yield to parameter values and their spatial aggregation using SWAT watershed simulation model. Dissertation Submitted to the Faculty of the School of Renewable Natural Resources. Graduate Collage. University of Arizona. 168 pp.
- Jones, L. A.; N. E. Smeck y L. P. Wilding. 1977. Quality of water discharged from three small agronomic watersheds in the Maumee River basin. *Journal of Environ Quality*. 6: 296 – 302.
- Junk, W. J., P. B. Bailey, and R. E. Sparks. 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 106:110-127.
- Kalma, J. D. and M. Sivapalan. 1995. *Scale Issues in Hydrological Modelling*. Wiley, Chichester. 489 pp.
- Karr, J. R. and I. J. Schlosser. 1978. Water resources and the land-water interface. *Science* 201:229-233.
- Keppeler E.; J. Lewis y T. Lisle. 2003. Effects of Forest Management on Streamflow, Sediment Yield and erosion, Caspar Creek experimental watershed. *In: First Interagency Conference on Research in the Watersheds*, Renard, Kenneth G.; McElroy, Stephen A.; Gburek, William J.; Canfield, H. Evan; Scott, Russell L., (eds.) October 27-30. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. pp: 77-82.
- Knight, C. G.; H. Chang; M. P. Staneva and Kostov. 2001 A simplified basin model for simulation runoff: the struma river GIS. *Prof. Geogr.* 53849: 533 – 545.
- Koning H., H. J. de, A. Vekdkamo, P. H. Verbulrg and A. R. Beergsma. 1998. CLUE: A tool for spatially explicit and scale sensitive exploration of land use changes. *In: Modelling global change impacts on tropical landscapes and biodiversity*. L. Lebel and D. Murdiyarso (eds.). Bogor, Indonesia. pp 29-40.
- Lane, L. J. and V. A. Ferreira. 1980. Sensitivity analysis. CREAMS. A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. *In: U. S. Department of Agriculture, Conservation Research Report No. 26*. Knisel, W. G. (ed). 643 pp.

- Langbein, W. B. and S. A. Schumm, 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Trans. Am. Geophys. Union*, 39:1076-1084.
- Law, A. M., and W. D. Kelton. 1982. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill Inc., 400 pp.
- León, J. D. 2001. Estudio y control de la erosión hídrica. Departamento de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 176 pp.
- Llerena, C. A. 2003. Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua, conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú. In: *Sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas*. FAO. Junio 9 – 12. Arequipa, Perú. 74 pp.
- Logan, T. J. 1979. The Maumee River basin pilot watershed study. II: Sediment, phosphates and heavy metal transport. EPA – 905/9-79-005-B. USEPA, Chicago, IL. 257 pp.
- Lowrance, R. R., R.L. Todd, J. Fail, O. Hendrickson, R. Leonard, and L.E. Asmussen. 1984. Riparian forests as nutrient filters in agricultural watersheds. *Bioscience* 34:374-377.
- Lugo H., J. 1989. *Diccionario Geomorfológico*. Universidad Nacional Autónoma de México. México. D.F. 337 pp.
- Maidment, D. R. 1994. Hydrologic Modeling Using Arc/Info. Seminar. 14th Annual ESRI User Conference. Palm Springs, California. May 22.
- Martínez R., J. G. 1999. Sensitivity Analysis across scales and watershed discretization schemes using ARDBSN hydrological model and GIS. Dissertation Submitted to the Faculty of the School of Renewable Natural Resources. The University of Arizona. USA. 200 pp.
- Martínez R., J. G. y F. Moreno S. 2003. Sistema de información geográfica de las cuencas de los Ríos Nazas y Aguanaval como herramienta en la modelación de procesos hidrológicos. In: *Memoria del Simposio Binacional de Modelaje y Sensores Remotos México – USA*. De Alba A., A.; Reyes M., L. y Tiscareño L., M. (eds.) Junio 3-4. Aguascalientes, Ags. pp: 90-97.
- Martínez R., J. G.; A. Quiñonez Ch. y G. Medina G. 2004. Uso de Modelos digitales de elevación como herramienta en la modelación de procesos hidrológicos. In: *XVI Semana Internacional de Agronomía*. FAZ – UJED. Martínez R., J. J.; Berúmen P., S.; Martínez T., J. y Martínez R., A. (eds.) Septiembre 6-10. Gómez Palacio, Dgo. pp: 375-379.

- Mc Cuen, R. H. and W. M. Snyder. 1986. Hydrologic Modeling. Statistical Methods and Applications. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey. 568 pp.
- Meentemeyer, V. and E. O. Box. 1987. Scale effects in landscape studies. *In: Landscape heterogeneity and disturbance*. M. G. Turner (ed.), Springer-Verlag, NY. pp: 15-34.
- Mendoza C.; G. Bocco; E. López y M. Bravo. 2003. Estimación del escurrimiento superficial basado en PR y SIG en cuencas pobremente aforadas del centro de México. *In: Memoria del Simposio Binacional de Modelaje y Sensores Remotos México – USA*. De Alba A., A.; Reyes M., L. y Tiscareño L., M. (eds.) Junio 3-4. Aguascalientes, Ags. pp: 113-122.
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. *In: Symposium of the Society for Experimental Biology, the State and Movement of Water in Living Organisms*. G.E. Fogg. (ed.). Academic Press, Inc., N.Y., U.S.A. 19:205-234.
- Moore I. D. and R. B. Grayson. 1991. Terrain-Based Catchment Partitioning and Runoff Prediction Using Vector Elevation Data. *Water Resources Research*. 27(6):1177-1191.
- Murillo S., M. E. 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 de Maestría. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Campus Monterrey. División de Ingeniería y Arquitectura. Programa de Graduados en Ingeniería. Monterrey. 119 pp.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. *Journal of hydrology*, 10: 282-290.
- Neitsch, S. L.; J. G. Arnold; J. R. Kiniry; J. R. Williams and K. W. King . 2002. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation (Version 2000). Texas Water Resources Institute, College Station, Texas. 506 pp.
- Ollinger, S. V.; J. D. Aber y C. A. Federer. 1997. Estimating regional forest productivity and water yield using an ecosystem model linked to a GIS. *In: Journal Landscape Ecology*. Kluwer Academia Publishers. Belgium. 13: pp. 323 -324
- Omernik, J.M. 1987. Ecoregions of the United States: Map at a scale of 1:7,500,000. Suppl. *Annals American Assoc. Geogr.* 77(1).
- Pariani, S. 2005. Ciclo hidrológico. Información sobre riego en el mundo y en la Argentina. Ficha Técnica No. 1. Universidad Nacional de Luján. Argentina. pp 33.

- Peterjohn, W. T. and D. L. Correll 1984. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: Observations on the role of a riparian forest. *Ecology* 65:1466-1475.
- Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100:81-92.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, and D. C. Yoder (Coordinators), 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U. S. Department of Agriculture, Washington, D.C. Agricultural Handbook No. 703. 404 pp.
- Renard, K. G.; J. R. Cox and D.P. Post. 1985. Effects of soil erosion on productivity in the southwest. *In: Soil erosion and crop productivity*. Follet, R. F. and B. A. Stewart (eds.), Madison, WI. pp. 321-334.
- Rinaldo, A.; I. Rodriguez-Iturbe; R. Rigon; R. L. Bras; E. Ijjasz-Vasquez and A. Marani. 1992. Minimum Energy and Fractal Structures of Drainage Networks. *Water Resources Research*. 28(9):2183-2195.
- Rincón, M. 1999. Análisis de Sensibilidad del Impacto del Cambio del Uso de la Tierra en Procesos Hidrológicos Usando Sistemas de Información Geográfica. King's College London. Revisión Marzo del 2004 en: www.Kcl.Ac.Uk/Kis/Schools/Hums/Geog/Herb/Mrincon.Pdf
- Roth, N.E., J. D. Allan, and D.L. Erickson. 1996. Landscape influences on stream biotic integrity assessed at multiple scales. *Landscape Ecology* 11:141-156.
- Sasowsky, K. C. and T. W. Gardner. 1991. Watershed configuration and geographic information system parameterization for SPUR model hydrologic simulations: *Water Resources Bulletin* 27:7-18.
- Saxton, K.E., W.J. Rawls, J.S. Romberger, and R.I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50(4):1031-1036
- SECOPE. 2000. Programa Estatal de Desarrollo Urbano y Vivienda de Durango. Secretaria de comunicaciones y obras publicas del estado direccion de planeacion y urbanismo. Gobierno del estado de Durango. 183 pp.
- SEMARNAT, 2003. Informe de la situación del medio ambiente en México, 2002: Compendio de estadísticas nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. D.F. 275 pp.
- Semmens, D.J., S.N. Miller, M. Hernandez, I.S. Burns, W.P. Miller, D.C. Goodrich, W.G. Kepner, 2004, Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) - A GIS-Based Hydrologic Modeling Tool: Documentation and User Manual; U.S.

Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-1446. Revisión Abril del 2004 en: <http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa/>

- Singh, V. P., 1995. Watershed modeling. *In: Computer Models of Watershed Hydrology*. V. P. Singh (ed.). Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado. pp. 1-22.
- Sorooshian, S. and V. K., Gupta. 1995: Model Calibration. *In: Computer Models of Watershed Hydrology*. V. P. Singh (ed.). Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado. pp 1130.
- Sparks, R.E. 1995. Need for ecosystem management of large rivers and their floodplains. *BioScience* 45:168-182.
- SPP. 1980. Carta de Climas Chihuahua. Escala 1:1,000,000. Secretaría de programación y presupuesto. Dirección general de los servicios nacionales de estadística, geografía e informática. México, D.F.
- SPP. 1981. Carta Fisiográfica Chihuahua. Escala 1:1,000,000. Secretaría de programación y presupuesto. Dirección general de los servicios nacionales de estadística, geografía e informática. México, D.F.
- SRH, 1970. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Boletín Hidrológico Num. 35. Región Hidrológica Num. 36. Zona de los ríos Nazas y Aguanaval. Tomo I. (s.p.).
- Storck, P.; L. Bowling; P. Wetherbee and D. Lettenmaier. 2000. Application of a GIS-Based Distributed Hydrology Model for Prediction of Forest Harvest Effects on Peaks Streamflow in the Pacific Northwest. Revisión Mayo del 2004 en: <http://www.ce.washington.edu/~pxs/gis.html>
- Sun, G.; S. G. McNulty and J. Moore. 2003. Modeling the potential effects of forest management and climate change on water yield across the southeastern U.S. Southern Global Change. USDA Forest Service. Revisión en Octubre del 2004 en: www.tucson.ars.ag.gov/icrw/Proceedings/Sun.pdf
- Theobald, M.D. 2000. GIS Concepts and Arc View methods. Colorado State University. USA. 133 pp.
- TRAGSATEC, TRAGSA Y MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 1998. Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas y Control de la Erosión. Ingeniería Medioambiental. Ediciones Mundi-Prensa. 2ª Edición. 945 pp.
- Vahos Montoya, J. D. 2003. Generación de modelos digitales hidrológicos y de pérdida de suelo y su comparación con métodos tradicionales en la cuenca del río Claro (Suroeste Antioqueño). Tesis de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia.

Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Ciencias Forestales. Colombia. 106 pp.

- Velásquez, A.; J. F. Mas y J. L. Palacio. 2002. Análisis del cambio de uso de suelo. Convenio INE-IGg (UNAM). Instituto de Geografía, UNAM. México. 80pp.
- Vieux, B. E. 1993. DEM Agregation and Smoothing Effects on Surface Runoff Modeling. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 7(3):310-338.
- Vieux, B. E. and S. Needham, 1993. Nonpoint-Pollution Model Sensitivity to Grid-Cell Size. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 119(2):141-157.
- Viramontes P., D. y Decroix, L. 2001. Consecuencias Hidrológicas de la Sobreutilización del Medio en la Alta Cuenca del Río Nazas. *In: XI Congreso Nacional de Irrigación Simposio 5. Manejo Integral de Cuencas*. Septiembre 19-21 Guanajuato, Guanajuato, México. pp 23-29.
- Weller, M.C., M.C. Watzin, and D. Wang. 1996. Role of wetlands in reducing phosphorus loading to surface water in eight watersheds in the Lake Champlain Basin. *Environ. Man.* 20:731-739.
- Wilcox, B. P., K. R. Cooley, and C. L. Hanson, 1989. Predicting snowmelt runoff on sagebrush rangeland using a calibrated SPUR hydrology model, *Trans. ASAE*, 32, 1351-1357,
- Williams, J. R. 1995. The EPIC Model. Chapter 25. *In: Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO. pp. 909-1000
- Wischmeier, W. H., and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion loss: A guide to conservation planning. *Agricultural handbook 537*. U. S. Department of Agriculture, Washington, D.C. 58 pp.
- Wood, E. F., 1994. Scaling, soil moisture and evapotranspiration in runoff models. *Advances Water Resources*, 17: 25-34.
- Wood, E. F., M. Sivapalan, K. Beven, and L. Band, 1988. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 102: 29-47.

Anexo 1

Tabla 19. Calibración con tamaño de cuenca 12,500 ha, periodo 1975-1979, vegetación 1976, 21 drenajes generados.

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Cuenca	Tipos de suelo	Tipos de vegetación	Distribución HRU	Longitud de cause principal km	Escurrimiento promedio mm
1	27315.36	5.49	cambisol feozem fluvisol regosol litosol	Vegetación de Galería Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	22.946	45.646
2	16841.52	3.39	feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / regosol	12.146	36.856
3	51246.72	10.30	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	40.920	60.823
4	11357.28	2.28	feozem fluvisol regosol luvisol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Pastizal / regosol	10.965	35.174
5	46190.88	9.29	feozem fluvisol regosol planosol litosol	Vegetación de Galería Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Pastizal / regosol	18.976	34.846
6	10307.88	2.07	fluvisol regosol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / litosol	18.234	224.945
7	69724.08	14.02	cambisol feozem regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	47.811	61.981
8	42020.28	8.45	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Mesquital Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	30.327	59.902
9	18714.24	3.76	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	8.962	40.724
10	13653.36	2.74	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	10.211	140.745
11	34988.40	7.03	cambisol feozem	Bosque de Encinos Bosque de Pinos	Bosque de Pinos / regosol	43.576	160.338

			xerosol fluvisol regosol	Pastizal Superficie agrícola			
12	236.88	0.05	xerosol feozem fluvisol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / feozem	.739	172.439
13	15496.92	3.12	xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	10.302	137.644
14	13751.64	2.76	xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	4.169	139.511
15	16261.56	3.27	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	15.445	138.774
16	859.32	0.17	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Encinos / xerosol	4.666	133.384
17	17029.80	3.42	cambisol xerosol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	14.872	156.384
18	21553.56	4.33	cambisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	9.332	155.259
19	26578.80	5.34	xerosol feozem regosol planosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	10.954	137.364
20	21572.64	4.34	xerosol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	15.105	139.133
21	21743.28	4.37	feozem fluvisol regosol castañozem litosol	Vegetación de Galería Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	10.984	60.520

Tabla 20. Validación con tamaño de cuenca 12,500 ha, periodo 1981-1985, vegetación 1976, 21 drenajes generados.

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Cuenca	Tipos de suelo	Tipos de vegetación	Distribución HRU	Longitud de cause principal km	Escurrimiento promedio mm
1	27315.36	5.49	cambisol feozem fluvisol regosol litosol	Vegetación de Galería Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	22.946	63.478
2	16841.52	3.39	feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / regosol	12.146	56.937
3	51246.72	10.30	cambisol xerosol	Area sin vegetación aparente	Bosque de Pinos / litosol	40.920	75.876

			feozem fluvisol regosol planosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola			
4	11357.28	2.28	feozem fluvisol regosol luvisol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Pastizal / regosol	10.965	54.926
5	46190.88	9.29	feozem fluvisol regosol planosol litosol	Vegetación de Galería Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Pastizal / regosol	18.976	54.634
6	10307.88	2.07	fluvisol regosol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / litosol	18.234	228.891
7	69724.08	14.02	cambisol feozem regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	47.811	77.660
8	42020.28	8.45	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Mesquital Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	30.327	71.136
9	18714.24	3.76	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	8.962	59.495
10	13653.36	2.74	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	10.211	79.485
11	34988.40	7.03	cambisol feozem xerosol fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	43.576	257.612
12	236.88	0.05	xerosol feozem fluvisol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / feozem	.739	109.871
13	15496.92	3.12	xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	10.302	75.612
14	13751.64	2.76	xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	4.169	80.714
15	16261.56	3.27	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	15.445	77.886
16	859.32	0.17	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Encinos / xerosol	4.666	92.279

17	17029.80	3.42	cambisol xerosol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	14.872	254.716
18	21553.56	4.33	cambisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	9.332	253.528
19	26578.80	5.34	xerosol feozem regosol planosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	10.954	78.596
20	21572.64	4.34	xerosol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizal Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	15.105	77.911
21	21743.28	4.37	feozem fluvisol regosol castañozem litosol	Vegetación de Galería Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	10.984	71.463

Tabla 21. Calibración con tamaño de cuenca 25,000 ha, periodo 1975-1979, vegetación 1976, 11 drenajes generados.

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Cuenca	Tipos de suelo	Tipos de vegetación	Distribución HRU	Longitud de cause principal km	Escurrimiento promedio mm
1	51246.72	10.30	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	27.822	74.276
2	11357.28	2.28	feozem fluvisol regosol luvisol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Pastizal / regosol	10.965	44.169
3	90340.92	18.16	cambisol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Vegetación de Galería Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / regosol	25.630	46.833
4	10307.88	2.07	fluvisol regosol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / litosol	18.234	224.945
5	69724.08	14.02	cambisol feozem regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	36.159	74.686
6	74362.68	14.95	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Mesquital Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	40.538	45.903
7	34988.40	7.03	cambisol	Bosque de Encinos	Bosque de Pinos /	23.011	173.798

			xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	regosol		
8	29476.80	5.93	xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	11.041	156.382
9	54834.48	11.02	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	15.475	157.579
10	49003.20	9.85	xerosol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	8.623	156.699
11	21743.28	4.37	feozem fluvisol regosol castañozem litosol	Vegetación de Galería Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	10.948	75.358

Tabla 22. Validación con tamaño de cuenca 25,000 ha, periodo 1981-1985, vegetación 1976, 11 drenajes generados.

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Cuenca	Tipos de suelo	Tipos de vegetación	Distribución HRU	Longitud de cause principal km	Escorrentamiento promedio mm
1	51246.72	10.30	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	27.822	84.782
2	11357.28	2.28	feozem fluvisol regosol luvisol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Pastizal / regosol	10.965	62.376
3	90340.92	18.16	cambisol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Vegetación de Galería Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / regosol	25.630	65.469
4	10307.88	2.07	fluvisol regosol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / litosol	18.234	228.891
5	69724.08	14.02	cambisol feozem regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	36.159	86.130
6	74362.68	14.95	cambisol xerosol feozem	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales	Bosque de Pinos / regosol	40.538	63.318

			fluvisol regosol litosol	Mesquital Superficie agrícola			
7	34988.40	7.03	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	23.011	285.585
8	29476.80	5.93	xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	11.041	92.100
9	54834.48	11.02	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	15.475	94.630
10	49003.20	9.85	xerosol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	8.623	92.490
11	21743.28	4.37	feozem fluvisol regosol castañozem litosol	Vegetación de Galería Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	10.948	82.293

Tabla 23. Calibración con tamaño de cuenca 75,000 ha, periodo 1975-1979, vegetación 1976, 3 drenajes generados.

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Cuenca	Tipos de suelo	Tipos de vegetación	Distribución HRU	Longitud de cause principal km	Escurrimiento promedio mm
1	385246.43	77.46	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol luvisol planosol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Mesquital Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	80.822	94.756
2	90340.9216	18.17	cambisol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Vegetación de Galería Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / regosol	4.838	88.260
3	21743.2800	4.37	feozem fluvisol regosol castañozem litosol	Vegetación de Galería Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	10.984	140.793

Tabla 24. Validación con tamaño de cuenca 75,000 ha, periodo 1981-1985, vegetación 1976, 3 drenajes generados.

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Cuenca	Tipos de suelo	Tipos de vegetación	Distribución HRU	Longitud de cause principal km	Escurrimiento promedio mm
1	385246.43	77.46	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol luvisol planosol litosol	Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Mesquital Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	80.822	96.506
2	90340.9216	18.17	cambisol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Vegetación de Galería Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / regosol	4.838	98.633
3	21743.2800	4.37	feozem fluvisol regosol castañozem litosol	Vegetación de Galería Area sin vegetación aparente Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	10.984	137.204

Tabla 25. Calibración con tamaño de cuenca 12,500 ha, periodo 1981-1985, vegetación 1993, 21 drenajes generados.

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Cuenca	Tipos de suelo	Tipos de vegetación	Distribución HRU	Longitud de cause principal km	Escurrimiento promedio mm
1	27315.36	5.49	cambisol feozem fluvisol regosol litosol	Vegetación de Galería Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	22.946	59.023
2	16841.52	3.39	feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / regosol	12.146	51.694
3	51246.72	10.30	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	40.920	70.308
4	11357.28	2.28	feozem fluvisol regosol luvisol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Pastizal / regosol	10.965	50.074
5	46190.88	9.29	feozem fluvisol regosol planosol litosol	Vegetación de Galería Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Pastizal / regosol	18.976	49.769
6	10307.88	2.07	fluvisol regosol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / litosol	18.234	228.891
7	69724.08	14.02	cambisol feozem regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	47.811	72.247
8	42020.28	8.45	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	30.327	65.054
9	18714.24	3.76	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	8.962	54.682
10	13653.36	2.74	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	10.211	70.580
11	34988.40	7.03	cambisol feozem xerosol fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	43.576	238.969
12	236.88	0.05	xerosol feozem fluvisol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / feozem	.739	98.701
13	15496.92	3.12	xerosol	Bosque de Encinos	Bosque de Pinos /	10.302	66.407

			feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	regosol		
14	13751.64	2.76	xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	4.169	72.447
15	16261.56	3.27	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales	Bosque de Pinos / regosol	15.445	69.026
16	859.32	0.17	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / xerosol	4.666	81.069
17	17029.80	3.42	cambisol xerosol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	14.872	235.435
18	21553.56	4.33	cambisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	9.332	234.128
19	26578.80	5.34	xerosol feozem regosol planosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	10.954	70.311
20	21572.64	4.34	xerosol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	15.105	68.971
21	21743.28	4.37	feozem fluvisol regosol castañozem litosol	Vegetación de Galería Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	10.984	65.296

Tabla 26. Validación con tamaño de cuenca 12,500 ha, periodo 1991-1995, vegetación 1993, 21 drenajes generados.

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Cuenca	Tipos de suelo	Tipos de vegetación	Distribución HRU	Longitud de cause principal km	Escurrimiento promedio mm
1	27315.36	5.49	cambisol feozem fluvisol regosol litosol	Vegetación de Galería Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	22.946	94.426
2	16841.52	3.39	feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / regosol	12.146	87.668
3	51246.72	10.30	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	40.920	110.101
4	11357.28	2.28	feozem fluvisol regosol luvisol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales	Pastizal / regosol	10.965	87.598

			litosol	Superficie agrícola			
5	46190.88	9.29	feozem fluvisol regosol planosol litosol	Vegetación de Galería Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Pastizal / regosol	18.976	87.354
6	10307.88	2.07	fluvisol regosol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / litosol	18.234	250.661
7	69724.08	14.02	cambisol feozem regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	47.811	110.035
8	42020.28	8.45	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	30.327	107.246
9	18714.24	3.76	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	8.962	90.831
10	13653.36	2.74	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	10.211	43.383
11	34988.40	7.03	cambisol feozem xerosol fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	43.576	354.883
12	236.88	0.05	xerosol feozem fluvisol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / feozem	.739	58.864
13	15496.92	3.12	xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	10.302	40.229
14	13751.64	2.76	xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	4.169	45.632
15	16261.56	3.27	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales	Bosque de Pinos / regosol	15.445	42.564
16	859.32	0.17	xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / xerosol	4.666	29.057
17	17029.80	3.42	cambisol xerosol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	14.872	352.560
18	21553.56	4.33	cambisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	9.332	351.579
19	26578.80	5.34	xerosol feozem regosol planosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	10.954	44.401
20	21572.64	4.34	xerosol	Bosque de Encinos	Bosque de Pinos /	15.105	42.395

			feozem fluvisol regosol planosol litosol	Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	regosol		
21	21743.28	4.37	feozem fluvisol regosol castañozem litosol	Vegetación de Galería Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	10.984	108.191

Tabla 27. Calibración con tamaño de cuenca 25,000 ha, periodo 1981-1985, vegetación 1993, 11 drenajes generados.

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Cuenca	Tipos de suelo	Tipos de vegetación	Distribución HRU	Longitud de cause principal km	Escurrimiento promedio mm
1	51246.72	10.30	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	27.822	84.782
2	11357.28	2.28	feozem fluvisol regosol luvisol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Pastizal / regosol	10.965	62.376
3	90340.92	18.16	cambisol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Vegetación de Galería Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / regosol	25.630	65.469
4	10307.88	2.07	fluvisol regosol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / litosol	18.234	228.891
5	69724.082	14.02	cambisol feozem regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	36.159	86.130
6	74362.68	14.95	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	40.538	63.318
7	34988.40	7.03	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	23.011	285.585
8	29476.80	5.93	xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	11.041	92.100
9	54834.48	11.02	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	15.475	94.630
10	49003.20	9.85	xerosol	Bosque de Encinos	Bosque de Pinos /	8.623	92.490

			feozem fluvisol regosol planosol litosol	Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	regosol		
11	21743.28	4.37	feozem fluvisol regosol castañozem litosol	Vegetación de Galería Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	10.948	82.293

Tabla 28. Validación con tamaño de cuenca 25,000 ha, periodo 1991-1995, vegetación 1993, 11 drenajes generados.

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Cuenca	Tipos de suelo	Tipos de vegetación	Distribución HRU	Longitud de cause principal km	Escurrimiento promedio mm
1	51246.72	10.30	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	27.822	131.876
2	11357.28	2.28	feozem fluvisol regosol luvisol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Pastizal / regosol	10.965	105.753
3	90340.92	18.16	cambisol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Vegetación de Galería Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / regosol	25.630	105.876
4	10307.88	2.07	fluvisol regosol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / litosol	18.234	250.661
5	69724.082	14.02	cambisol feozem regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / litosol	36.159	131.533
6	74362.68	14.95	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	40.538	106.652
7	34988.40	7.03	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	23.011	395.762
8	29476.80	5.93	xerosol feozem fluvisol regosol litosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	11.041	53.577
9	54834.48	11.02	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol	Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	15.475	56.244
10	49003.20	9.85	xerosol	Bosque de Encinos	Bosque de Pinos /	8.623	53.977

			feozem fluvisol regosol planosol litosol	Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	regosol		
11	21743.28	4.37	feozem fluvisol regosol castañozem litosol	Vegetación de Galería Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	10.948	130.593

Tabla 29. Calibración con tamaño de cuenca 75,000 ha, periodo 1981-1985, vegetación 1993, 3 drenajes generados.

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Cuenca	Tipos de suelo	Tipos de vegetación	Distribución HRU	Longitud de cause principal km	Escurrimiento promedio mm
1	385246.43	77.46	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol luvisol planosol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	80.822	86.330
2	90340.9216	18.17	cambisol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Vegetación de Galería Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / regosol	4.838	86.929
3	21743.2800	4.37	feozem fluvisol regosol castañozem litosol	Vegetación de Galería Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / feozem	10.984	118.426

Tabla 30. Validación con tamaño de cuenca 75,000 ha, periodo 1991-1995, vegetación 1993, 3 drenajes generados.

Subcuenca	Superficie (ha)	% de Cuenca	Tipos de suelo	Tipos de vegetación	Distribución HRU	Longitud de cause principal km	Escurrimiento promedio mm
1	385246.43	77.46	cambisol xerosol feozem fluvisol regosol luvisol planosol litosol	Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Pinos / regosol	80.822	137.591
2	90340.9216	18.17	cambisol feozem fluvisol regosol planosol litosol	Vegetación de Galería Cuerpos de agua Bosque de Encinos Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola	Bosque de Encinos / regosol	4.838	132.504
3	21743.2800	4.37	feozem fluvisol regosol castañozem	Vegetación de Galería Cuerpos de agua Bosque de Encinos	Bosque de Encinos / feozem	10.984	168.525

			litosol	Bosque de Pinos Pastizales Superficie agrícola			
--	--	--	---------	--	--	--	--

Anexo 2

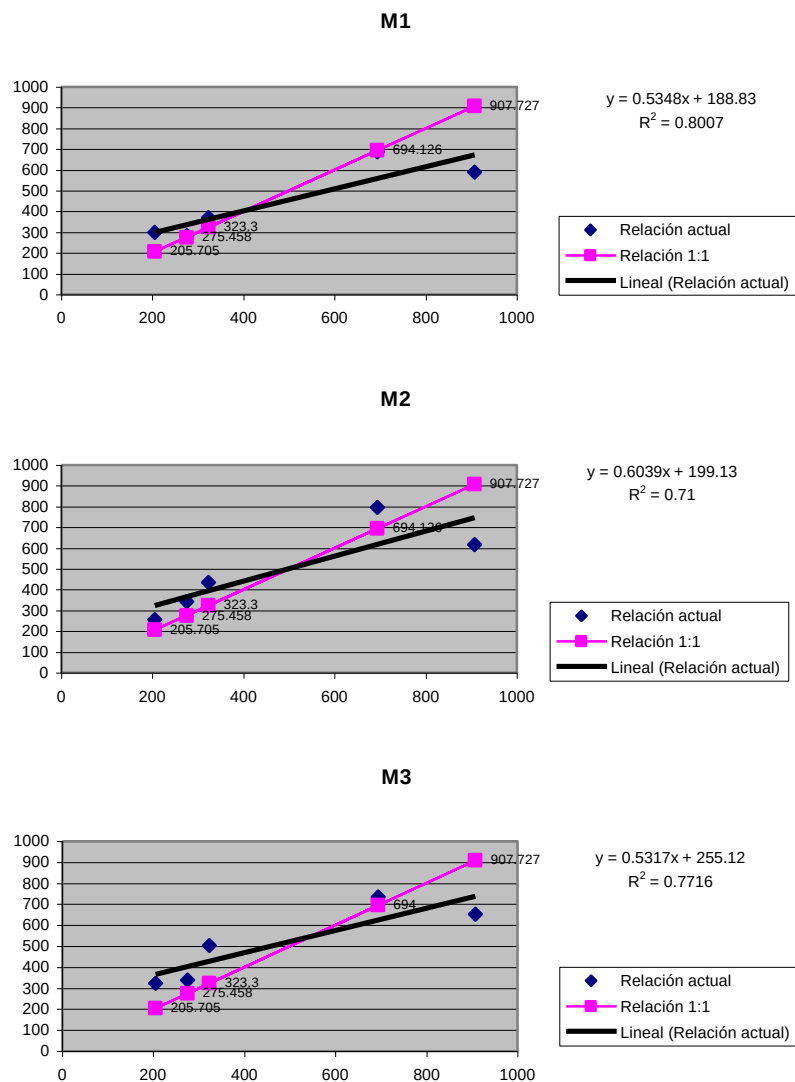


Figura 34. Relación 1:1 del volumen de escurrimiento en Mm^3 para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en calibración de la vegetación de 1976.

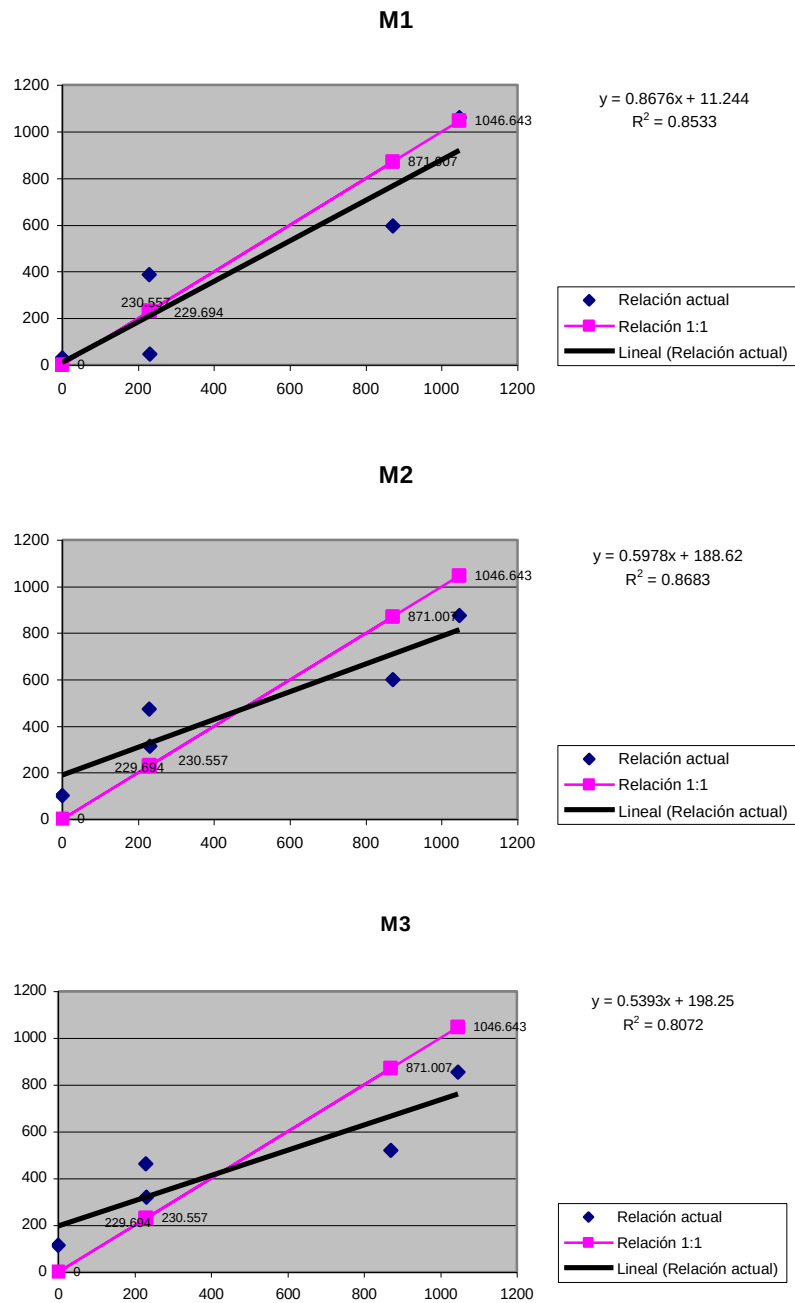


Figura 35. Relación 1:1 del volumen de escurrimiento en Mm^3 para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en calibración de la vegetación de 1993.

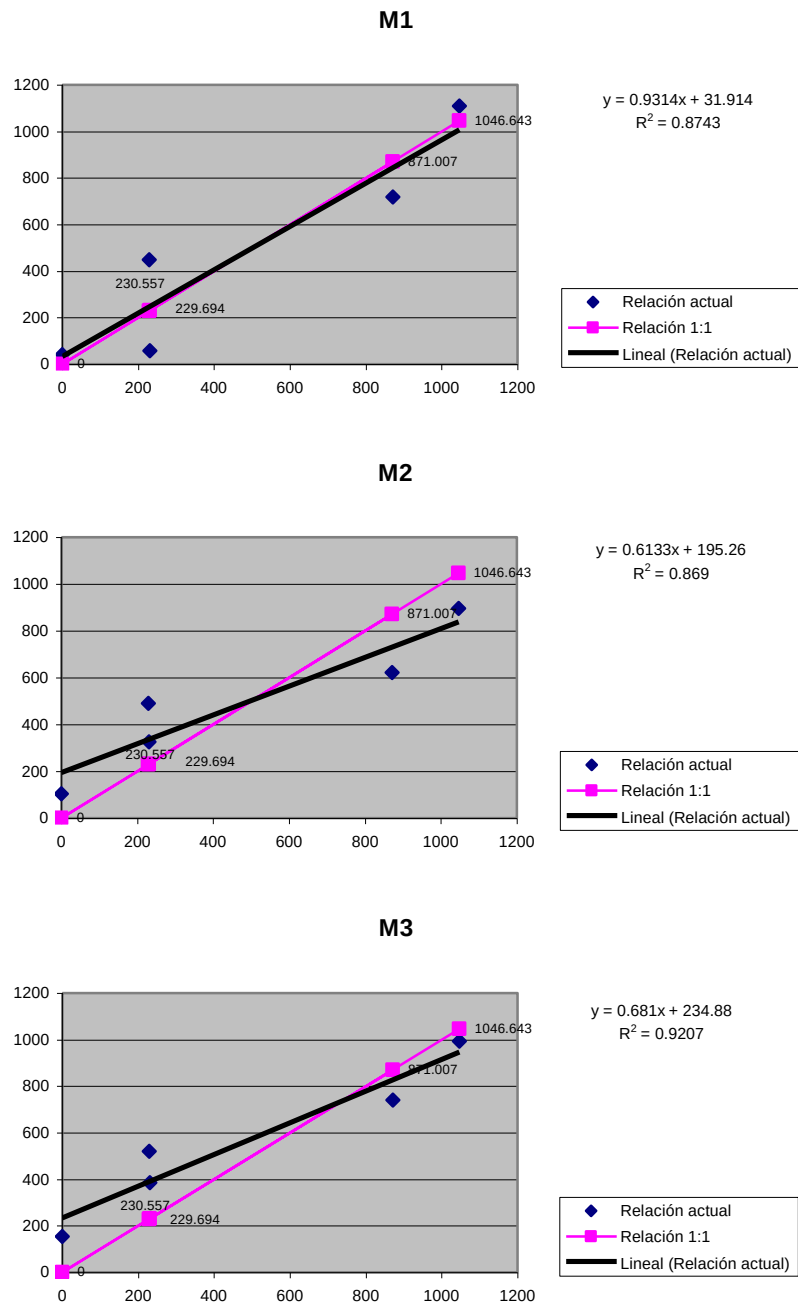


Figura 36. Relación 1:1 del volumen de escurrimiento en Mm^3 para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en validación de la vegetación de 1976.

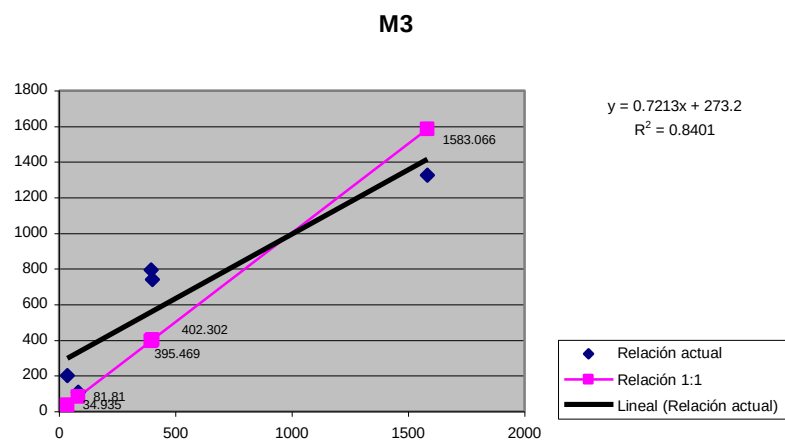
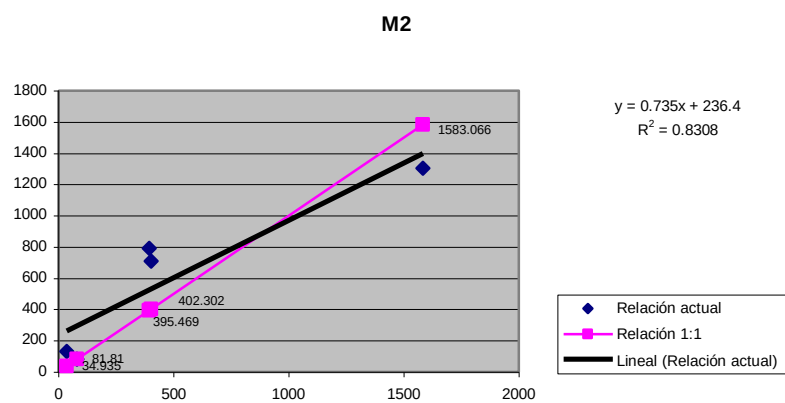
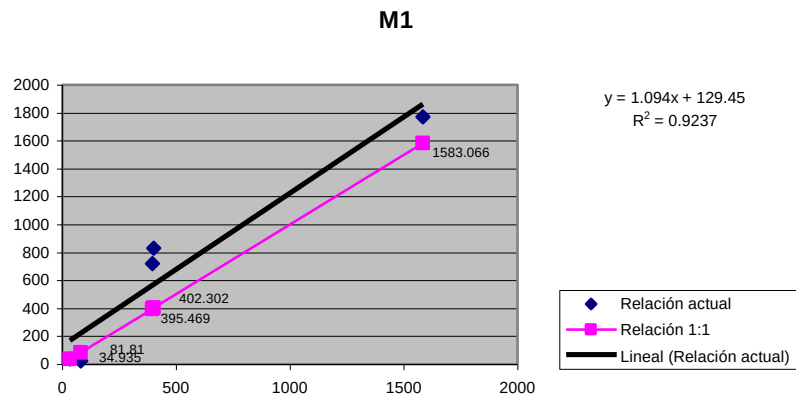


Figura 37. Relación 1:1 del volumen de escurrimiento en Mm³ para valores simulados y observados en M1, M2 y M3 en validación de la vegetación de 1993.