

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ALIMENTACIÓN Y  
DESARROLLO A. C.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA SUB-CUENCA RÍO SAN  
PEDRO, NAYARIT, MÉXICO A TRAVÉS DE SISTEMAS DE  
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y MODELOS DIGITALES DE  
ELEVACIÓN.

Por  
RAFAEL HERNÁNDEZ-GUZMÁN

---

Tesis aprobada por la  
UNIDAD MAZATLÁN EN ACUICULTURA Y MANEJO AMBIENTAL  
Como requisito parcial para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Mazatlán, Sinaloa, México, Agosto de 2006

## APROBACIÓN

Los miembros de este comité designado para revisar la tesis de Rafael Hernández Guzmán, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias, con especialidad en Manejo Ambiental.



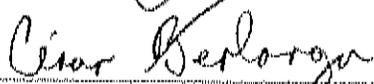
---

Dr. Arturo Ruiz Luna  
Director de Tesis



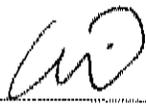
---

Dr. Miguel Botanicourt Lozano



---

Dr. Cesar A. Berlanga Robles



---

M. C. Joanna Acosta Velázquez

## DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

Se permite citas breves sin permiso especial del autor, siempre y cuando se otorgue el crédito correspondiente. Se podrá solicitar permiso al Director del Centro o Jefe del Área correspondiente del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C. apartado postal 1735, Hermosillo, Sonora CP 83000 México, para citas o consultas más completas con fines académicos. En otras circunstancias, se deberá solicitar permiso del autor.

La publicación en comunidades científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar los créditos al CIAD, previa aprobación escrita del director.

---

Dr. Alfonso Antero Gardea Béjar  
Director General del CIAD, A. C.

## Agradecimientos

Al Dr. Arturo Ruiz Luna, por haber dirigido el presente trabajo y por haberme dado la oportunidad de avanzar y dar un gran paso más en mi formación profesional. Por su guía, paciencia y estímulo incesante. Su dedicación a la educación y a la investigación científica de calidad es el ejemplo que espero seguir en todos mis esfuerzos futuros.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca y apoyo otorgado. Al proyecto Fomix NAYARIT-2003-C01-9593. Gracias por permitirme llevar a cabo esta investigación.

A cada uno de mis sinodales: Dr. César A. Berlanga Robles, Dr. Miguel Betancourt Lozano, y M. en C. Joanna Acosta Velázquez. Gracias por sus valiosas observaciones y correcciones al documento, por su invaluable ayuda, paciencia y los conocimientos recibidos, les estoy muy agradecido.

Al M. en C. Germán Ramírez Reséndiz, responsable del Laboratorio de Cómputo del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología – UNAM, Unidad Mazatlán, por el apoyo prestado con el equipo de cómputo, por su asesoría y asistencia con los programas. Definitivamente, “Las computadoras no son eternas”, gracias Teacher, fue muy valioso su apoyo y sus comentarios.

Al L. S. C. A. Arnoldo Gpe. Vázquez Aguilar, responsable de la Biblioteca y del Laboratorio de Cómputo del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C. Unidad Mazatlán, por poner a mi total disposición los paquetes y equipo de cómputo a su cargo. Por su asesoría y asistencia en los programas de cómputo.

Un profundo y especial reconocimiento a la Sra. Ma. Clara Ramírez Jáuregui por la disponibilidad y apoyo otorgado en la búsqueda y obtención de literatura. ¿Que sería la biblioteca Regional “Dra. María Elena Caso Muñoz” - ICMYL - UNAM sin tí? No contaríamos con mucha de la literatura que hoy citamos en nuestras tesis, mejor dicho, no sería biblioteca. Mil gracias por tu invaluable ayuda.

Gracias al Dr. Juan Madrid, por gastar algo de su tiempo casi cada Lunes o Viernes durante mi estancia en Mazatlán. Gracias por las pláticas y consejos durante los incontables eventos sociales a los que asistimos.

A la Dra. Rosalba Rodríguez Alonso, por todo el apoyo brindado. Gracias por hacerme sentir como de la familia.

Agradecimiento especial a la Ing. Elizabeth Frausto Sotelo, por todo el apoyo brindado en el presente trabajo, por sus conocimientos en el análisis de imágenes, sus consejos de programación, y su apoyo al momento de hacer cada presentación.

A los amigos y compañeros de la Maestría y del Laboratorio de Manejo Ambiental con quienes me tocó compartir y departir momentos extraordinarios de convivencia, ideas, clases, trabajos y diversión. Pablo, Ricardo, Beatriz, Edgar, Zohar, Joanna, Karina, Aimee, Ricardo (Mudo), Serbia, Priscila y muchos otros más. Ya en serio, por la amistad brindada mil gracias a todos ustedes, ya me conocen como soy.

DIOS es grande y mis padres también. A ellos también les agradezco y no por estar al último les resto importancia. Gracias a cada uno de ellos por darme fuerzas y por inspirarme a seguir adelante.

Gracias a todos y a cada uno de los que colaboraron en la elaboración de la presente tesis.

*Dedicatoria*

*A mis padres  
Por confiar en mí y siempre  
alentarme a seguir adelante. A  
ellos les digo que aun queda  
mucho por venir.*

*A Elizabeth  
Tu amor y confianza siempre han  
sido una luz en mi camino. Gracias  
por tu paciencia y comprensión en  
los momentos difíciles.*

*A mis hermanos  
Por su confianza, por  
enseñarme que la base es el  
trabajo y la constancia.  
Especialmente a Esther,  
recuerda que nunca es tarde  
para continuar.*

*"Working weeks come to its end, party time is here again"  
(Come with me, Depeche Mode)*

**Contenido**

**Índice de Tablas** ..... iii

**Índice de Figuras** ..... v

**Resumen** ..... vii

**Abstract** ..... viii

**INTRODUCCIÓN** ..... 1

**OBJETIVOS** ..... 8

**REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA** ..... 9

*Cuencas Hidrológicas* ..... 10

*Percepción Remota en Hidrología* ..... 12

*Antecedentes de los Modelos Hidrológicos y Sistemas de Información Geográfica*... 14

*Modelo Digital de Elevación* ..... 17

*Escurrimiento* ..... 19

**MATERIALES Y MÉTODOS** ..... 23

*Área de Estudio* ..... 23

*Caracterización Física de la Sub-cuenca* ..... 26

*Caracterización de la Estructura de Drenaje de la Sub-cuenca* ..... 26

**Preparación del Modelo Digital de Elevación** ..... 30

**Red de Drenaje** ..... 32

**Sub-cuencas** ..... 33

*Estimación del Efecto Producido por Cambios de Usos de Suelo en el Escurrimiento en la Sub-cuenca Río San Pedro* ..... 34

**Selección y Preprocesamiento de las Imágenes** ..... 36

**Clasificación de las Imágenes** ..... 37

**Evaluación de la Exactitud** ..... 38

**Análisis de Detección de Cambio** ..... 39

**Tipo de Suelos** ..... 40

**Escurrimiento** ..... 41

*Determinación de las Unidades de Respuesta Hidrológica* ..... 44

*Integración del Sistema de Información Geográfica* ..... 46

<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>48</b>
<i>Datos Meteorológicos .....</i>	<i>48</i>
<i>Caracterización de la Estructura de Drenaje de la Sub-cuenca .....</i>	<i>49</i>
<b>Sub-cuencas .....</b>	<b>49</b>
<b>Red de drenaje.....</b>	<b>53</b>
<i>Cambios de Uso de Suelo y su Efecto en el Escurrimiento en la Sub-cuenca Rio San Pedro.....</i>	<i>59</i>
<b>Clasificación y Evaluación de la Exactitud.....</b>	<b>59</b>
<b>Detección de Cambio.....</b>	<b>67</b>
<b>Tipo de Suelos.....</b>	<b>77</b>
<b>Escurrimiento .....</b>	<b>80</b>
<i>Determinación de la Unidades de Respuesta Hidrológica .....</i>	<i>90</i>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>98</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>100</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>102</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Área y porcentaje de la sub-cuenca Río San Pedro. ....	23
<b>Tabla 2.</b> Suelos presentes en la zona de estudio de acuerdo a la clasificación de FAO, ISRIC e ISSS. ....	25
<b>Tabla 3.</b> Definición de las coberturas y usos del terreno consideradas en el presente estudio. ....	35
<b>Tabla 4:</b> Definición de los grupos hidrológicos de suelos (SCS, 1972; USDA, 1986; Neitsch et al., 2002; Halley et al., 2004). ....	41
<b>Tabla 5.</b> Categorías de uso de suelo y su número de curva asociado considerado en este estudio. ....	44
<b>Tabla 6.</b> Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio. ....	48
<b>Tabla 7.</b> Área, perímetro (P) e índice de compacidad (Kc) de cada una de las sub-cuencas. ....	50
<b>Tabla 8.</b> Exactitud global, coeficiente de Kappa y evaluación del error para la clasificación de la imagen Landsat ETM+ del 2000. ....	60
<b>Tabla 9.</b> Superficie en hectáreas y tendencias de cambio de las coberturas y uso del terreno de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México. ....	62
<b>Tabla 10.</b> Matrices de detección de cambio de las cobertura del terreno (ha) de la sub-cuenca Río San Pedro, Nay., México y evaluación del coeficiente de Kappa para los periodos 1973-1990, 1990-2000 y 1973-2000. Nota: AC (Agua), MN (Manglar), MR (Marisma), AGR (Agrícola), VS (Vegetación secundaria), SLV (Selva), SD (Suelo desnudo), POB (Poblados). ....	71
<b>Tabla 11.</b> Tipos de suelo (FAO, ISRIC e ISSS, 1998) presentes en la sub-cuenca Río San Pedro. ....	78
<b>Tabla 12.</b> Volumen de escurrimiento (Q Vol) en la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México, estimado para un valor de Precipitación de 53.1 mm (2.09 pulgadas), en función del Grupo hidrológico de suelo (HSG) y número de curva (CN) asociado, para 1973, 1990 y 2000. ....	86

<b>Tabla 13.</b> Unidades de Respuesta Hidrológica delimitadas considerando la pendiente como factor principal y la cobertura y uso del terreno como factor secundario en la producción de escurrimiento. CN (Número de curva), Q (Volumen de escurrimiento). .....	92
---	----

## Índice de Figuras

<b>Fig. 1.</b> Localización geográfica del área de estudio, especificando el límite de la cuenca Río San Pedro en el estado de Nayarit, y los municipios que la conforman. Coordenadas en unidades UTM (Zona 13N).	24
<b>Fig. 2.</b> Representación en formato raster de un Modelo Digital de Elevación	27
<b>Fig. 3.</b> Límite de la mascara para delimitar el área de bajo relieve en la zona costera de Nayarit.	29
<b>Fig. 4.</b> Matriz representando las depresiones (celdas en gris claro) en un Modelo Digital de Elevación	31
<b>Fig. 5.</b> Representación de las ocho posibles direcciones que se pueden producir durante la determinación de la Dirección de Flujo.	32
<b>Fig. 6.</b> Capas que constituyeron el Sistema de Información Geográfica para la Sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit.	47
<b>Fig. 7.</b> Localización geográfica de once estaciones meteorológicas (●) dentro y fuera de la sub-cuenca Río San Pedro, Nay.	49
<b>Fig. 8.</b> Sub-cuenclas obtenidas a partir del Modelo Digital de Elevación.	51
<b>Fig. 9.</b> Límite de la sub-cuenca Río San Pedro y red de drenaje extraída del Modelo Digital de Elevación.	55
<b>Fig. 10.</b> Red de drenaje en la parte sur (boca) de la sub-cuenca. A) Orden de drenaje y B) Red modelada de un área problemática con lagunas y cuerpos de agua de la sub-cuenca Río San Pedro, Nay.	56
<b>Fig. 11.</b> Cobertura y usos del terreno de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México, a partir de clasificación de imágenes Landsat (1973-2000).	64
<b>Fig. 12.</b> Zonas de mayor pérdida de los cuerpos acuáticos (1973-2000) en la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México.	73
<b>Fig. 13.</b> Mapa temático de los Grupos Hidrológicos de Suelos de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México.	79

- Fig. 14.** Mapas temáticos de los números de Curva de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México, para las tres fechas de estudio.....82
- Fig. 15.** Área de la Sub-cuenca Río San Pedro y su correspondiente clase del número de curva para las tres fechas de estudio. ....84
- Fig. 16.** Mapas temáticos del volumen de Escurrimiento (en miles de  $m^3$ ) de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México. ....89
- Fig. 17.** Unidades de Respuesta Hidrológica delimitadas para la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México, considerando a la pendiente como factor primario y a la cobertura del terreno como factor secundario en la producción de escurrimiento. .93

## Resumen

En el presente estudio se determinaron las características físicas de la subcuenca Río San Pedro, Nayarit y se estimó el efecto del cambio de coberturas y usos del terreno, de 1973 a 2000, sobre el volumen de escurrimiento. Los cambios del paisaje se determinaron por medio de la clasificación no supervisada de escenas del satélite Landsat (MSS, TM y ETM+). La respuesta del escurrimiento a los cambios de coberturas y usos del terreno se estimó usando el método del Número de Curva. La delimitación de subcuenclas, la estructura de drenaje y la identificación de unidades de respuesta hidrológicas (URH) se determinaron por medio del análisis de modelos digitales de elevación (MDE). La extensión del área de estudio se estimó en aproximadamente 290,000 ha, delimitándose un total de 58 subunidades con extensión de 57 a 23,916 ha. El índice de compacidad (Kc), que representa la respuesta de la cuenca, se situó entre los valores de 1.52 y 5.65, que indican que todas las unidades definidas pueden presentar una respuesta hidrológica retardada. La exactitud de la clasificación se calculó por medio de una matriz de error (sólo para la escena del 2000), obteniendo una exactitud global de 82% y un valor del coeficiente de Kappa de 0.79. El tipo de cobertura que predominó en las tres fechas de estudio (1973, 1990 y 2000), fue la selva, con 65%, 44%, y 66%, respectivamente. Se estima que hubo cambios que representan del 20 al 25% de la extensión total del paisaje de la subcuenca. El escurrimiento total para 1973 fue estimado en aproximadamente  $25 \times 10^6 \text{ m}^3$ , presentando el mayor volumen bajo el complejo Cobertura – Grupo hidrológico: Selva (Pobre) – C, que representa el 18% del escurrimiento total. El año de 1990 presentó un escurrimiento cercano a  $27 \times 10^6 \text{ m}^3$ , siendo Suelo desnudo (Pastizal) – C con un 22%, el que tuvo mayor contribución en la producción de escurrimiento. De forma similar para el año 2000, el volumen total de escurrimiento se aproximó a  $26 \times 10^6 \text{ m}^3$ , con mayor escurrimiento bajo el complejo Selva (Regular) – C con un 34% del escurrimiento total. Con respecto a las URH, se delimitaron 17 unidades considerando la pendiente como factor principal y la cobertura y uso del terreno como factor secundario en la producción de escurrimiento. La URH 14 (Selva-Vegetación secundaria) con pendientes de 21–40° es la que ocupa mayor extensión en la sub-cuenca con un 27% (77,078 ha). Aunque la clase Agrícola es una cobertura importante en la sub-cuenca, la URH 1 (Agrícola) con pendientes de 0 – 10°, ocupa sólo un 11% (32,732 ha), pero es esta URH la que presenta mayor volumen de escurrimiento por unidad de área ( $196 \text{ m}^3/\text{ha}$  contra  $138 \text{ m}^3/\text{ha}$  producido por la URH 14). Los resultados del presente trabajo pueden ser utilizados para delimitar estrategias para propósitos de conservación y manejo del recurso agua a diferentes escalas, ya sea por categorías de grupo hidrológico – uso del terreno o por unidades de respuesta hidrológica para toda la sub-cuenca.

## Abstract

A physical characterization of the Rio San Pedro sub-basin was made in this study, estimating the effect of land use and land cover changes from 1973 to 2000, on the runoff volume. The landscape changes were assessed by means of unsupervised classification of Landsat scenes (MSS, TM, and ETM+). The runoff response to landscape changes was estimated using the Curve Number method. The sub-basin boundaries, the drainage structure and the hydrologic response units (HRU) were determined using digital elevation models (DEM). The estimated study area was around 290,000 ha, and 58 sub-units, covering from 57 to 23,916 ha, were delimited. The watershed response was estimated as function of the compactness ratio ( $K_c$ ), obtaining values for all the subunits between 1.52 and 5.65. Those values are associated with a delayed runoff response. The accuracy assessment, calculated just for the 2000 image from an error matrix, output a global accuracy estimate of 82% and 0.79 for the kappa coefficient. Forest was the dominant land cover in the three study dates (1973, 1990, 2000), with 65%, 44%, and 66% of the total landscape, respectively. The overall change since 1973 was estimated around 20 – 25% of the sub-basin landscape. The total runoff volume estimated for 1973 was around  $25 \times 10^6 \text{ m}^3$  with the Land cover – Hydrologic soil group complex Forest (Poor) – C, amounting 18% of the total runoff. For the year 1990, a runoff volume of about  $27 \times 10^6 \text{ m}^3$  was estimated with Exposed soil (grassland) – C as the category that contributed with the highest runoff volume (22%). Similarly for 2000, the total runoff was  $26 \times 10^6 \text{ m}^3$  with the highest runoff produced by the Forest (Fair) – C complex around 34% of the total runoff. Regarding to the HRU, a total of 17 units were defined considering the slope as the main factor and the land use the second factor in the runoff production. The HRU 14 (Forest-secondary succession) with slopes  $21-40^\circ$  represents the largest extent in the sub-basin, with 27% (77,078 ha). Although Agriculture is an important land cover in the sub-basin, the HRU 1 (Agricultural) with slopes of  $0 - 10^\circ$ , just occupies 11% (32,732 ha), but this is the HRU that presents the highest runoff volume for area ( $196 \text{ m}^3/\text{ha}$  against  $138 \text{ m}^3/\text{ha}$  produced by the HRU 14). Results from present study can be used to delineate strategies for conservation and management purposes at different scales, from land use – hydrologic soil group categories or hydrological response unit to the whole sub-basin scale.

---

## INTRODUCCIÓN

---

### CAPÍTULO I

El recurso agua, es sin lugar a dudas vital para todo ser vivo, por lo que se requiere de su continuo suministro, existiendo en la actualidad una crisis a nivel mundial que lejos de resolverse parece agravarse de manera continua en tanto no se emprendan acciones correctivas (WWDR1, 2003). Por ello, la disponibilidad y uso del agua se han convertido en materia fundamental para todos los gobiernos, debido a que se encara un rápido crecimiento de la población, aún cuando las tasas de crecimiento han disminuido a nivel mundial. Por otra parte, a causa de un aparente incremento en los estándares de vida, la demanda por suministros de agua confiables y seguros, especialmente en los centros de mayor población, nunca había sido tan intensa como ahora. Como consecuencia de esta demanda, actualmente se encaran problemas ambientales en los que gobiernos de todos los niveles se enfrentan a la toma de decisiones que repercuten en un adecuado suministro y calidad de agua a nivel local, pero que puede afectar la relación con las entidades o gobiernos con los que se comparte el recurso, por lo que se hace necesaria la introducción del concepto de cuenca como unidad de manejo.

La UNESCO (WWDR2, 2006) señala que uno de los mecanismos de alivio a la pobreza consiste en hacer llegar este líquido a todas las comunidades, sin embargo debido a los cambios ambientales como el calentamiento global que ha generado el proceso de desarrollo, se han presentado condiciones ambientales extremas, manifestadas como inundaciones y sequías. Estos son los desastres relacionados con el agua dulce que resultan ser más mortales, quebrando además el desarrollo socioeconómico, sobre todo en los países en vías de desarrollo. Por lo anterior, los problemas inherentes al recurso agua pueden agruparse en tres categorías: sobreabundancia, escasez y contaminación.

La deforestación y la homogeneización del paisaje, principalmente por el desarrollo agrícola y urbano, aumenta el riesgo de inundaciones durante eventos de alta precipitación, que causan grandes daños materiales y en ocasiones la pérdida de vidas. En contraparte, la falta de disponibilidad de agua también es un problema y como consecuencia, se incrementa la tasa de explotación de mantos acuíferos, se favorece la desertificación y podría tener como consecuencia la pérdida de ambientes críticos como los humedales. Los servicios que los humedales prestan son diversos, ya que permiten la recarga de acuíferos, actúan como hábitat para una importante variedad de organismos, pueden servir como control de inundaciones durante periodos húmedos y funcionan como filtros depuradores de aguas contaminadas.

La contaminación del agua a partir de la actividad industrial, agrícola y las descargas de aguas negras procedentes de zonas urbanas y rurales involucra una variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos que pueden causar diversos problemas a nivel local y regional. Los contaminantes pueden ser vertidos en una comunidad y posteriormente ser movidos río abajo causando problemas en una nueva localización, por lo que es necesario analizar la problemática desde un contexto de cuencas, a fin de manejar el recurso agua de manera apropiada y con una visión integral.

El análisis ambiental en un contexto de cuencas permite entender las interrelaciones entre los recursos y condiciones naturales (relieve-suelo-clima-vegetación), así como las formas en las cuales la población se organiza para apropiarse de los mismos y su impacto en la cantidad, calidad y temporalidad del agua y otros recursos. Por esta razón se considera que las cuencas hídricas constituyen un marco apropiado para el análisis de los procesos ambientales generados como consecuencia de las decisiones en materia de uso y manejo de los recursos suelo, agua y vegetación (Cotler y Priego, 2004). En este sentido, una limitante de trabajar a nivel de cuenca es precisamente la complejidad de representar la respuesta hidrológica, por lo que se han desarrollado varios modelos hidrológicos con el fin de dar una representación exhaustiva de cómo se comporta el sistema, siendo éste el tema central del presente estudio.

Los modelos hidrológicos son fundamentales en el manejo, desarrollo y evaluación del recurso agua. A pequeña escala, son utilizados para propósitos variados, como planeación y diseño de prácticas de conservación de suelo, manejo de agua para irrigación, restauración de humedales, y restauración de ríos. A gran escala, son utilizados para proyectos de protección ante inundaciones, rehabilitación de presas, evaluación de calidad de agua, y previsión del suministro de agua (Singh y Woolhiser, 2002).

De acuerdo con Singh (1995) los modelos pueden clasificarse con base en diferentes criterios. Por ejemplo, pueden ser de ciclo hidrológico *concentrado* o *distribuido* en función del tipo de proceso que utilizan para representar los diferentes componentes. En un modelo *concentrado*, las variables espaciales como la precipitación, la infiltración, la evaporación, el escurrimiento y las características fisiográficas de la cuenca son eliminadas asumiendo promedios volumétricos, mientras que en un modelo *distribuido* estas variables son consideradas. En cualquier caso se requiere de vasta información para representar las características físicas e hidrológicas de una cuenca, sin embargo, si el modelo toma en cuenta la variabilidad espacial de procesos (de tipo *distribuido*), la cantidad de información requerida se incrementa notablemente, ya que cada unidad hidrológica estará caracterizada por su topografía, su geología, su tipo y uso del suelo, su climatología, entre otros.

Por lo anterior, la disponibilidad de datos determina el tipo de modelo que se puede utilizar, a pesar de que en la mayoría de los casos estos datos no están disponibles en su totalidad, son inexactos, o no son homogéneos. Si el volumen de datos requeridos es grande, su procesamiento puede ser complicado tanto a nivel de proceso como de comprensión (Singh, 1995; Singh y Woolhiser, 2002). De acuerdo con Singh (1995), el modelado de cuencas requiere datos representativos y confiables por lo que la recolección, el almacenamiento y la manipulación puede complicarse en función de la naturaleza espacial de los datos hidrológicos, el volumen y la organización de datos. En particular los modelos distribuidos, son los que requieren grandes volúmenes de datos. Sin embargo, a través del uso de SIG que proporciona un ambiente flexible para

introducir, analizar y desplegar grandes cantidades de datos digitales de varias fuentes necesarias para identificar características ambientales, por lo que tales datos pueden ser compilados y procesados con relativa facilidad para extraer, sobreponer y delimitar características de una cuenca lo que permite su integración con los modelos hidrológicos (Singh, 1995; Singh y Woolhiser, 2002).

Como la mayoría de los recursos naturales continentales, el agua que drena hacia el mar en un espacio finito denominado cuenca, distribuyéndose sobre lugares concretos, son susceptibles de ser representados en mapas inventariados y clasificados, lo que permitiría contar con una visión general del sistema estudiado y de sus posibles relaciones con el entorno. Esta herramienta de ordenación, por lo tanto, ofrece una visión integral y territorial del dato (en su localización geográfica, y en sus características temáticas), que permite mejorar las técnicas analíticas, incluyendo las estadísticas y las geo-estadísticas (Boceo, 2004).

Aunado a lo anterior el desarrollo de las técnicas de percepción remota (PR) permiten determinar las características físicas del terreno, mismas que gobiernan los procesos hidrológicos y hacen posible un modelado hidrológico a gran escala. La necesidad de detectar cambios en la respuesta hidrológica y en la cobertura del terreno en diferentes escalas espaciales y temporales hace de la percepción remota basada en imágenes de satélite una de las fuentes de datos más eficientes y confiables en los estudios hidrológicos (Melesse y Shih, 2002; Melesse *et al.*, 2003). Por su continua actualización y resolución, los datos de percepción remota se están utilizando como un sustituto de los mapas de cobertura y uso del terreno obtenidos por medios convencionales, y son las imágenes Landsat ejemplos de datos que han demostrado ser útiles para rastrear los cambios en el escurrimiento que ocurren en una cuenca debido al cambio de uso del terreno (Melesse y Shih, 2002).

En años recientes, algunos estudios hidrológicos se han enfocado a cuantificar el efecto de los cambios en la cobertura y uso del terreno en la dinámica del escurrimiento de cuencas (Kokkonen y Jakeman, 2002). Estos cambios son importantes ya que el uso del terreno es una característica importante del proceso de escurrimiento que afecta la

infiltración, la erosión, y la evapotranspiración, siendo un ejemplo claro el incremento en el escurrimiento por la conversión de áreas naturales a rurales y posteriormente a áreas urbanas (USDA, 1986; Melesse y Shih, 2002).

Actualmente, las metodologías para determinar el escurrimiento normalmente se basan en registros de flujo de largo plazo para el área (USDA, 1986), sin embargo este tipo de registros raramente están disponibles para áreas pequeñas de drenaje. Tal es el caso de la sub-cuenca Río San Pedro, área de interés para el presente trabajo. Por consiguiente es importante estimar las descargas y el escurrimiento con modelos hidrológicos de tipo *concentrado*, basados en características medibles de la cuenca como la cobertura y uso del terreno, tipo de suelo, precipitación, estructura de drenaje, entre otros. El Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 1986) indica que sólo a través de la comprensión de estas características y la experiencia en el uso de estos modelos se puede evaluar cómo la alteración de los parámetros del modelo reflejan los cambios en las condiciones de las cuencas y, por lo tanto, de las oportunidades de ordenamiento y manejo de las mismas.

Considerando algunas de las limitantes en el registro de la información indispensables para evaluar las características necesarias para la comprensión del funcionamiento de cuencas, en 1956 el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) en la actualidad Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en inglés) del USDA, desarrolló el método que ahora es referido como *número de curva*, utilizado para calcular la cantidad de escurrimiento diario y como éste es afectado por las prácticas de uso del terreno (Singh y Woolhiser, 2002).

El método del *número de curva* (CN, por sus siglas en inglés) es un modelo basado en propiedades físicas de la cuenca y requiere pocos datos de entrada. Se basa en la utilización de cocientes tabulados (Números de Curva) para los diferentes usos de suelo y se pueden identificar a partir de tablas preestablecidas. Los números de curva son índices adimensionales determinados con base en el Grupo Hidrológico del Suelo (HSG, por sus siglas en inglés), uso del terreno, condiciones hidrológicas y el antecedente de humedad. El método del *número de curva* es capaz de reflejar el efecto

de los cambios del uso del terreno en el escurrimiento, y determina la capacidad de la cuenca de producir escorrentía para un nivel de precipitación determinado.

Con todos estos elementos, se han señalado evidentes ventajas en la utilización de este método, aunque de igual manera se han precisado algunas de sus debilidades o deficiencias. Entre otros, Ponce y Hawkins (1996), destacan que sus ventajas principales son:

- 1.- Su simplicidad, su previsibilidad, y su estabilidad como modelo para la estimación de la profundidad de escurrimiento directo basado en la profundidad de la precipitación, y es apoyado por datos empíricos;
- 2.- Su confianza en un sólo parámetro, el número de curva (CN), que varía como una función de cuatro propiedades de la cuenca para producir escurrimiento:  
Grupo Hidrológico del Suelo: A, B, C, y D  
Uso del suelo: Agrícola, Forestal, Urbano.  
Condición hidrológica: Pobre, Regular y Buena  
Antecedente de humedad: I, II, y III
- 3.- Es la única metodología de la agencia (SCS) cuyas características y entradas ambientales están razonablemente bien documentadas (Suelo, Tratamiento / Uso del terreno, Condición del Antecedente de Humedad)
- 4.- Es un método bien establecido, y ha sido ampliamente aceptado para su utilización en Estados Unidos y en otros países.

Las desventajas percibidas de acuerdo a estos autores son:

- 1.- Su marcada sensibilidad a la elección del número de curva. En algunas instancias, particularmente para números de curva y/o profundidades de precipitación bajas, el método puede ser muy sensible al número de curva y a las condiciones antecedentes;
- 2.- La ausencia de una guía clara de los efectos de la escala espacial. Sin una sub-división de la cuenca, su aplicación a cuencas grandes (mayores de 100 millas cuadradas o 250 km<sup>2</sup>) debe verse con precaución;

- 3.- La variación de la exactitud del método para diferentes biomas, ya que el método originalmente fue propuesto para sitios agrícolas, aunque actualmente se ha extendido a sitios urbanos.
- 4.- La fijación de la abstracción inicial como 0.2. Al principio parece ser una ventaja ya que reduce el número de parámetros a uno. Sin embargo, podría ser interpretado como un parámetro regional para reforzar la sensibilidad del método a una diversidad de configuraciones geológicas o climáticas.

Con base a lo anterior, y considerando las limitantes de información que son características de algunas regiones en el país, el presente estudio tiene como principal objetivo realizar una caracterización física de la sub-cuenca Río San Pedro mediante la delimitación de *unidades de repuesta hidrológica* (URH), analizando los posibles impactos en la dinámica hidrológica generados por el cambio de uso del terreno (análisis multitemporal de imágenes de satélite) y la aplicación del método del número de curva para estimar el escurrimiento. Dada las tendencias de cambio en la cobertura y uso del terreno de la sub-cuenca durante el periodo 1973-2000, se espera que la conversión de coberturas forestales a otros usos culturales haya incrementado de manera proporcional el volumen de escurrimiento del área de estudio.

Este estudio se integra dentro del proyecto de investigación **“Caracterización del Municipio de Santiago Ixcuintla, Nayarit mediante la evaluación de sus coberturas naturales, usos del suelo, características de los sistemas acuáticos y análisis de sus tendencias de cambio.”** que se desarrolla en el Laboratorio de Manejo Ambiental del CIAD. Si bien los límites geográficos del presente trabajo se extienden más allá de la delimitación municipal de Santiago Ixcuintla, esto obedeció a intentar generar un mejor entendimiento de las características y procesos físicos que afectan la cantidad de agua en la sub-cuenca.

---

## OBJETIVOS

---

### CAPÍTULO 2

El objetivo general de este trabajo fue determinar las características físicas de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, para estimar el efecto del cambio de uso de suelo en el volumen de escurrimiento de la sub-cuenca.

Para lograr este objetivo, se propusieron la consecución de los objetivos específicos siguientes:

1. Caracterizar la estructura de drenaje de la sub-cuenca Río San Pedro por medio de Modelos Digitales de Elevación.
2. Estimar el efecto que ha producido el cambio de uso de suelo en el escurrimiento en la sub-cuenca Río San Pedro durante el periodo 1973-200.
3. Determinar las Unidades de Respuesta Hidrológica con base en la estimación del número de curva.
4. Integrar los atributos y características espaciales de la sub-cuenca en un Sistema de Información Geográfica.

---

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

La revolución informática acontecida a partir de los años 60 ha introducido cambios drásticos en muchos aspectos de la sociedad. El desarrollo científico y tecnológico ha sido uno de los campos donde la informática ha tenido mayor impacto dado el potencial de cálculo de las computadoras, así como su creciente capacidad de almacenamiento y la reducción de su precio, que las hace cada vez más accesibles al público en general y de manera particular a los equipos de investigación, incluyendo los de pequeñas entidades. Dentro de este avance, las ciencias ambientales no han sido una excepción y aprovechando las capacidades de la informática, se han visto sometidas a una serie de cambios permitiendo el desarrollo de nuevas formas de trabajo diferentes a las tradicionales (Felicísimo, 1994).

En particular, el tratamiento de los datos geográficos es un caso en el que la evolución informática ha sido especialmente llamativa. A la función histórica de los mapas como referencia para los desplazamientos terrestres y marítimos, se ha añadido más recientemente la de servir de documento básico en la planificación territorial y de forma más general, para los estudios ambientales (Felicísimo, 1994).

El estudio de las zonas costeras requiere abordarse en grandes áreas con afinidad ambiental mediante estudios cartográficos detallados dado que en estas zonas vive aproximadamente el 60% de la población mundial que están ejerciendo una creciente presión sobre los recursos naturales (Green *et al.*, 1996). Actualmente, el análisis de gran parte de los fenómenos hidrológicos que ocurren sobre un determinado espacio geográfico suele tener como referencia a la unidad fisiográfica denominada cuenca (Felicísimo, 1994; Díaz *et al.*, 1999), de ahí que el concepto de cuenca puede ser introducido para delimitar zonas de estudio, concepto del cual se hace referencia a continuación.

### Cuencas Hidrológicas

Dada la extensión y complejidad geográfica que en general caracterizan a las cuencas, el uso de conceptos, términos y definiciones relacionados con el manejo de estas áreas geográficas es muy diverso y complejo. Para su caracterización, es importante en primer término diferenciar los conceptos de cuenca hidrográfica e hidrológica:

Según el INE (2005), la Cuenca Hidrográfica es la “unidad natural definida por la existencia de la divisoria de las aguas en un territorio dado. Son unidades morfográficas superficiales y sus límites quedan establecidos por la divisoria geográfica principal de las aguas de las precipitaciones, también conocido como parteaguas. El parteaguas, teóricamente, es una línea imaginaria que une los puntos de máximo valor de altura relativa entre dos laderas adyacentes pero de exposición opuesta; desde la parte más alta de la cuenca hasta su punto de emisión, en la zona hipsométricamente más baja. Al interior de las cuencas se pueden delimitar sub-cuencas o cuencas de orden inferior. Las divisorias que delimitan las sub-cuencas se conocen como parteaguas secundarios”.

Por su parte, la definición de Cuenca Hidrológica (INE, 2005), es más integral que la de cuenca hidrográfica. Las cuencas hidrológicas son unidades morfológicas integrales que además de incluir el concepto de cuenca hidrográfica, abarcan en su contenido, toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo.

Otro concepto utilizado para definir a las cuencas, particularmente relacionado con México, por su alcance y cobertura geográfica, es el ofrecido por el INEGI (2005), que señala que una cuenca está constituida por el agua que escurre en un río y que es captada en un área determinada, por lo general por la conformación del relieve, denominándose como cuenca hidrográfica. De acuerdo a la agencia norteamericana USGS (1997), la cuenca es un espacio geográfico de dimensiones variables, cuyos aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por la precipitación y que drena hacia llanuras de inundación, ríos, lagos o alimentando los mantos freáticos. Por su parte, Bocco (2004) la define como el área drenada por una corriente fluvial y sus tributarios. Sus componentes están definidos por el relieve, es decir, por la altitud y

cambios en la altitud; canales o cursos principales y tributarios, laderas, divisoria de aguas, y nivel de base.

Con la intención de integrar los aspectos más sobresalientes de los conceptos anteriores, para el presente trabajo se propone la siguiente definición de cuenca hidrológica: "Áreas naturales de dimensión variable determinadas por parteaguas, que dividen a la superficie terrestre en unidades útiles para propósitos administrativos para el manejo y conservación del recurso agua y para la evaluación de ecosistemas regidos por los mismos patrones hidrológicos, cuyos aportes hídricos principales son alimentados por la precipitación y que drena hacia un río principal, ya sea directamente o a través de sus afluentes". De ahí que en este estudio la cuenca sea considerada como una unidad adecuada para la gestión ambiental relevante para analizar los procesos ambientales generados como consecuencia de las decisiones en materia de uso y manejo de los recursos agua, suelos y vegetación. Aunado a lo anterior debe considerarse que los procesos operativos hidrológicos y su heterogeneidad espacial son definidos por el clima, topografía, geología, tipo de suelo, vegetación y uso del suelo, mismos que se encuentran relacionados con el tamaño de la cuenca (Singh y Woolhiser, 2002).

En función de su extensión, para que el área de drenaje sea considerada como cuenca debe tener una extensión de 50–500 km<sup>2</sup> de tamaño promedio, designándose como sub-cuenca a las áreas de 5–50 km<sup>2</sup>, como mini-cuencas 2.5 – 5.0 km<sup>2</sup> y micro-cuencas <2.5 km<sup>2</sup> (Anónimo, 1990; en Moharana y Kar, 2002). Al respecto, Singh (1995) menciona que generalmente las cuencas con área de 100 km<sup>2</sup> o menos pueden considerarse como pequeñas, aquellas con área de 100 a 1000 km<sup>2</sup> como medianas, y aquellas con área mayor de 1000 km<sup>2</sup> como grandes.

Por estar definidas como la combinación de la hidrología y topografía del paisaje, las cuencas hidrológicas son unidades que pueden ser vistas como la constitución física de una nación y, bajo este enfoque, se consideran divisiones lógicas o regiones del paisaje natural, por lo que son unidades de organización óptimas para tratar con el manejo del agua. Sin embargo, los límites de las cuencas raramente coinciden con jurisdicciones políticas, por lo que los datos sociales y económicos no son normalmente

recolectados con respecto a estos límites naturales. Considerando lo anterior, los SIG permiten reformular este conjunto diverso de datos en un marco de trabajo común (CWM, 1999), mientras que considerando las dimensiones de estas entidades, es gracias a la percepción remota que se puede obtener información relacionada con el tipo y uso del terreno y los procesos hidrológicos en estos límites.

### Percepción Remota en Hidrología

Sabins (1999) define a la percepción remota (PR) como la ciencia de adquirir, procesar e interpretar una imagen y datos relacionados, obtenidos de aviones y satélites que registran la interacción entre la materia y la radiación electromagnética. Esta radiación es tanto emitida como reflejada por la tierra (Schmugge *et al.*, 2002). Por su parte Lillesand *et al.* (2004), definen la PR como la ciencia y arte de obtener información acerca de un objeto, área, o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación. De acuerdo a Weng (2001), la PR recolecta datos multiresolución, multitemporales, y multispectrales, y los convierte en información valiosa para entender y dar seguimiento a los procesos que ocurren en la superficie terrestre y construir conjuntos de datos de cobertura del terreno.

Desde el lanzamiento del primero de una serie de satélites (TIROS, luego denominado Landsat 1) han incrementado las actividades relacionadas al cartografiado y monitoreo del cambio ambiental como una función de las presiones antropogénicas y procesos naturales (Treitz y Rogan, 2004). Actualmente, la PR es una de las herramientas más flexibles y poderosas para el manejo de recursos naturales y estudios ambientales (Fahasi *et al.*, 2000) y con la expansión paralela de las capacidades de procesamiento de las computadoras y los programas de cómputo denominados genéricamente *software*, los productos derivados de estos datos se han vuelto ampliamente aceptados por grupos de trabajo que no se dedican propiamente a estudios de percepción remota (Treitz y Rogan, 2004).

La revolución que acontece actualmente en el campo de la tecnología de la información (Guertin *et al.*, 2000) y las nuevas técnicas de recolección de datos, especialmente por PR (Singh y Woolhiser, 2002), están cambiando el quehacer relacionado con el manejo de cuencas. Este tipo de herramientas se está utilizando para el inventario y el monitoreo de características físicas de estas unidades (Guertin *et al.*, 2000); y los avances en años recientes en este campo han mitigado el problema de la escasez de datos que es una de las mayores dificultades en el modelado hidrológico (Singh y Woolhiser, 2002).

Muchos estudios han demostrado que los datos de PR proporcionan información temporal y espacial para el modelado de cuencas hidrológicas (Helmschrot y Flügel, 2002); así como mediciones de muchas de las variables hidrológicas utilizadas en este tipo de aplicaciones (Melesse y Shih, 2002). De igual manera Schmugge *et al.* (2002), opinan que la radiación solar reflejada puede ser utilizada para cartografiar coberturas del terreno y apoyar estudios de calidad de agua. La emisión termal en el infrarrojo es empleada para determinar la temperatura de la superficie, las microondas para la humedad del suelo, y los radares para estudios de precipitación.

Como se señaló anteriormente, un problema mayor en hidrología es la falta de datos adecuados para describir cuantitativamente un proceso hidrológico con precisión, por lo que la PR puede ayudar a mitigar este problema en algunos de los siguientes aspectos (Schultz, 1988 en Singh, 1995):

- 1 Produce medidas de área en lugar de medidas puntuales.
- 2 Toda la información es recolectada y almacenada en un lugar.
- 3 Ofrece alta resolución en espacio y/o tiempo.
- 4 Los datos están disponibles en forma digital.
- 5 Los datos de áreas remotas e inaccesibles pueden ser recolectados.
- 6 Una vez que las estaciones de PR están instaladas, la medición de los datos es relativamente barata.

Entre los satélites con datos de utilidad hidrológica se ubican las series: NOAA, TIROS, SPOT, Landsat, y Meteosat. Los datos de PR son útiles especialmente donde los sitios de recolección y el costo-efectividad de la recolección son importantes. Permiten definir mejor los tipos de suelo y coberturas del terreno sobre una cuenca (necesarios para determinar infiltración, evapotranspiración, y escurrimiento) y hacer mediciones sobre el espacio en lugar de sólo un punto, permitiendo corregir errores de datos basados en medidas puntuales como es el caso de la precipitación y la evaporación que son datos de entrada para modelos hidrológicos (Singh, 1995).

#### Antecedentes de los Modelos Hidrológicos y Sistemas de Información Geográfica

Los modelos hidrológicos son fundamentales en el manejo, desarrollo y evaluación del recurso agua requeridos para la planeación y diseño de prácticas de conservación de suelo, programas de irrigación, restauración de humedales y de protección ante inundaciones, rehabilitación de presas, evaluación de calidad y previsión del suministro de agua (Singh y Woolhiser, 2002). Considerando lo anterior, la automatización del proceso de caracterización de cuencas ha sido posible gracias a la disponibilidad de datos geoespaciales y programas de cómputo que procesan tales datos. Varias interfaces han adoptado un acercamiento automatizado para unirlos con modelos hidrológicos derivando información de entrada (Koka, 2004). De acuerdo a Singh (1995) los modelos hidrológicos abundan en la literatura hidrológica y el estado del modelado está razonablemente avanzado, particularmente en el contexto de la aplicación práctica. Sin embargo, estos modelos aun no llegan a ser herramientas comunes en la planeación o toma de decisiones.

En los últimos años, a pesar de la revolución en la tecnología de la información y de la comunicación, nuevas perspectivas han revelado que los modelos hidrológicos no han tomado ventaja de todo esto. Algunos ejemplos incluyen la PR y los SIG que permiten la adquisición de datos sobre áreas extensas e incluso inaccesibles, así como su manejo. Es esta información la que en muchos casos llega a ser crucial para la selección

de un modelo y determina el valor económico tanto de los datos como del modelo mismo (Singh, 1995).

La década de los 60 presencié la revolución digital que hizo posible la integración de modelos de diferentes componentes del ciclo hidrológico y la simulación de casi la cuenca entera, como se ejemplificó por la contribución del Modelo de Cuencas de Stanford –SWM (ahora HSPF) diseñado por Crawford y Linsley en 1966. Este fue posiblemente el primer intento por modelar casi el ciclo hidrológico entero (Singh y Woolhiser, 2002). Desde entonces, ha habido una proliferación de modelos, de diferentes tipos y con diferentes propósitos. Sin embargo, muchos de ellos comparten similitudes estructurales mientras que otros son completamente diferentes. Como se señaló anteriormente, los modelos pueden clasificarse con base en diferentes criterios (Singh, 1995), por ejemplo por el tipo de proceso que utilicen para representar los diferentes componentes del ciclo hidrológico (concentrados o distribuidos), en función de la escala (espacial o temporal) que utilicen, y de la técnica de solución (numérica, analógica, o analítica).

En un modelo “*concentrado*” las variables independientes espaciales no son consideradas y se asumen promedios volumétricos y espaciales de parámetros y variables dependientes de tal forma que pueden describir variaciones temporales pero no variaciones espaciales (Ponce, 1989; Singh, 1995). En general, son simples pero pueden simular el comportamiento de una cuenca con exactitud, especialmente si las propiedades de la cuenca no varían mucho espacialmente. Los modelos “*distribuidos*”, por otro lado, retienen variables espaciales, generan mejores resultados debido a que consideran tales variaciones como la diferencia entre el potencial de escurrimiento entre diferentes usos del terreno (Swenson, 2003). Debido a que los modelos distribuidos requieren grandes cantidades, en la mayoría de los casos son simplificados eliminando una o dos dimensiones espaciales, las cuales pueden introducir serias distorsiones (Singh, 1995; USGS, 1997), por ejemplo, no tomar en cuenta la variabilidad espacial o temporal de la infiltración u otras pérdidas por abstracción en el cálculo de la profundidad total para un evento de precipitación o área de drenaje dada. Considerando

el problema de la cantidad de datos requeridos para el modelado hidrológico y también el potencial de los Sistemas de Información Geográfica para almacenar, analizar y manipular grandes volúmenes de información, estas herramientas son utilizadas en el modelado hidrológico para facilitar el procesamiento, manejo e interpretación de datos hidrológicos (Melesse y Shih, 2002).

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema computarizado para capturar y procesar datos de naturaleza geográfica distribuidos espacialmente (Liakath, 2002). Es un arreglo de equipo de cómputo y accesorios, programas y datos geográficos con los que las personas capacitadas interactúan para integrar, analizar, y visualizar los datos; identificar relaciones, modelos y tendencias, con la finalidad de encontrar soluciones a los problemas (Sabins, 1999; ESRI, 2004), así como analizar objetos o fenómenos donde la localización geográfica es una característica importante o crítica para el análisis. El sistema está diseñado para capturar, almacenar, actualizar, manipular, y desplegar información geográfica (Singh, 1995; Sabins, 1999; Guertin *et al.*, 2000; Koka, 2004) como la topografía, climatología, uso del terreno, tipo de suelo (Eastman, 2003). Melesse y Shih, (2002), mencionan que un SIG puede generar datos (atributos) tanto espaciales como no espaciales, teniendo como núcleo del sistema a la base de datos, una colección de mapas e información asociada en formato digital (Liakath, 2002), por lo que proporciona un ambiente flexible para introducir, analizar y desplegar datos digitales de varias fuentes necesarias para identificar características ambientales, hacer detección de cambio y desarrollar base de datos (Weng, 2001).

Aunque los SIGs han evolucionado a través de las últimas cuatro décadas, el mayor impulso en el desarrollo de estas herramientas se ha dado sólo en las últimas dos décadas (Singh, 1995). Lillesand *et al.* (2004) mencionan que hoy en día pueden tratar con casi cualquier tipo de información acerca de características que pueden ser referenciadas por una localización geográfica.

Los SIG son herramientas afines a los intereses que tiene la hidrología. Ofrecen nuevas oportunidades para coleccionar, guardar, analizar y desplegar datos hidrológicos distribuidos espacialmente (Jain y Singh, 2005), y de acuerdo a Morad y Triviño (2001),

en la actualidad apoyan en la construcción de modelos hidrológicos, especialmente cuando es necesaria la representación espacial de redes de drenaje. Aunque originalmente los SIG fueron desarrolladas para la cartografía, actualmente se están empleando para análisis de inventarios, en la planeación, en el modelado hidrológico (Singh, 1995), y en los sistemas de toma de decisiones (Guertin *et al.*, 2000).

Una de las funcionalidades más importantes de un SIG, concretamente en el ámbito de las aplicaciones hidrológicas, es la descripción de la topografía y características físicas de una cuenca, entendiéndose como tales la composición de suelos, estimación de pendientes y caracterización de coberturas. Singh y Woolhiser (2002), mencionan que un ejemplo del uso de SIG es que permite subdividir la cuenca en sub-áreas hidrológicamente homogéneas. Con estas técnicas es posible delimitar tasas de pérdida de suelo e identificar áreas potenciales de fuentes no puntuales de contaminación agrícola. De acuerdo con Díaz *et al.* (1999), las características físicas desempeñan un papel esencial en el estudio y comportamiento de los componentes del ciclo hidrológico como la evaporación, infiltración, flujo superficial, entre otros. El insumo básico para este análisis son los Modelos Digitales de Elevación (MDE).

### Modelo Digital de Elevación

La disciplina de la cartografía ha pasado por un gran número de cambios que se centran en la emergente influencia del análisis y manipulación digital de los datos para la preparación de material cartográfico y para el uso en un SIG (Ellassal y Caruso, 1983). La fuente primaria de información topográfica a principios de los 80 consistió de mapas de contorno. El avance en el cartografiado digital ha proporcionado herramientas esenciales para representar la naturaleza en tercera dimensión (3D) o volumétrica de la topografía del paisaje (Singh y Woolhiser, 2002).

La topografía juega un papel importante en la distribución y flujo de agua dentro del paisaje natural. Los procesos hidrológicos y problemas relacionados con el recurso agua son comúnmente investigados utilizando modelos hidrológicos distribuidos. Estos

modelos requieren información fisiográfica como la configuración de la red de drenaje, longitud y pendiente del canal, y propiedades geométricas de las sub-cuencas. Tradicionalmente, estos parámetros son obtenidos de mapas o estudios de campo. Durante las últimas tres décadas esta información ha sido derivada directamente de representaciones digitales de la topografía. Esta representación digital de la topografía es conocida como Modelo Digital de Elevación (Garbrecht y Martz, 1999).

Los Modelos Digitales de Elevación consisten en una matriz de elevaciones del terreno, en formato digital, generalmente calculados a intervalos regularmente espaciados (Elassal y Caruso, 1983; Brown *et al.*, 2000), siendo definidos como arreglos bidimensionales correspondientes a una imagen o estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno sobre algún Datum (Felicísimo, 1994; Díaz *et al.*, 1999; Eastman, 2003). La estructura de datos más común es la raster o estructura GRID. Esta estructura normalmente consiste de una matriz de celdas cuadradas con la elevación media de la celda almacenada en un arreglo bidimensional. La localización de una celda en el espacio geográfico es implícita de la localización de la columna y renglón de la celda dentro del arreglo. Otra estructura de datos MDE, como Red Irregular de Triángulos (TIN) y estructuras basadas en líneas de contorno, han superado algunas de las desventajas del GRID, sin embargo tienen limitaciones (la superficie es representada como un conjunto de puntos conectados formando triángulos irregulares y para generar este tipo de estructura los puntos deben ser de una excelente calidad) y no son ampliamente disponibles como los MDE en formato GRID para el análisis de cuencas (Garbrecht y Martz, 1999). Del análisis de estos datos se pueden extraer automáticamente variables topográficas, como la geometría de la cuenca, pendiente, aspecto, dirección y acumulación de flujo, y red de drenaje (Morad y Triviño, 2001; Singh y Woolhiser, 2002).

El problema de identificar la extensión de la red de drenaje a partir de datos digitales de elevación ha sido estudiado por muchos años, a una gran variedad de escalas y desde distintos acercamientos, reforzando el potencial y debilidad de utilizar los DEMs para tal identificación. Estos estudios han demostrado que la precisión de los parámetros

extraídos de los Modelos Digitales de Elevación son comparables con aquellos obtenidos por métodos manuales mientras que el tiempo de procesamiento es menor (O'Callaghan y Mark, 1984; Jenson y Domingue, 1988; Montgomery y Dietrich, 1992; Martz y Garbrecht, 1998; Garbrecht y Martz, 1997; 1999; Maidment, 1996; Tarboton, 1997; Wang y Yin, 1998; Turcotte *et al.*, 2001; Lin *et al.*, 2006). Los mayores problemas están relacionados a la correcta delimitación de la red de drenaje en áreas planas o de baja elevación como es el caso en la zona costera del estado de Nayarit.

Lee (2004), menciona que la extracción de estas características hidrológicas de los MDE se ha vuelto uno de los procedimientos principales en muchos SIG debido a dos tendencias recientes: las funciones de los SIG para procesar MDE son más fáciles de usar y los MDE están cada vez más disponibles, accesibles incluso sin costo a través de la Internet. Son precisamente las cualidades operativas de los MDE las que están haciendo que su tratamiento sea un procedimiento común en todas las modelaciones orientadas al campo de la hidrología, siendo una de ellas la determinación del escurrimiento.

### Escurrecimiento

El escurrimiento es definido como el agua líquida neta suministrada a los canales a escalas de tiempo comparables con la duración de la tormenta después de la evaporación, evapotranspiración, intercepción, infiltración y percolación a los acuíferos (Sharma *et al.*, 2001). Estas abstracciones hidrológicas actúan para reducir la precipitación total en precipitación efectiva, siendo esta última la que eventualmente produce escurrimiento una vez que la intensidad de precipitación excede la capacidad de absorción de la cuenca (Ponce, 1989). Esta es una de las variables hidrológicas más importantes usadas en la mayoría de las aplicaciones del recurso agua. La predicción confiable de la cantidad y tasa de escurrimiento de la superficie del terreno en ríos y arroyos, así como la recolección de datos hidrológicos y meteorológicos necesarios en los modelos convencionales de predicción de las descargas de ríos, son procesos

difíciles, costosos y largos (Nayak y Jaiswal, 2003). En este sentido, la PR puede ser una fuente confiable y de bajo costo en el modelado de estos parámetros.

En general, el papel de la PR en el cálculo de escurrimiento es proporcionar una fuente de datos de entrada o como información accesoria para estimar los parámetros del modelo. Los datos de satélite pueden ser interpretados para derivar información temática sobre el uso del terreno, suelo, vegetación y drenaje, los cuales, combinados con medidas convencionales de parámetros climáticos (precipitación y temperatura) y parámetros topográficos (alturas, curvas de elevación y pendiente), proporcionan datos de entrada para los modelos de escurrimientos (Nayak y Jaiswal, 2003).

De acuerdo a Guertin *et al.* (2000), muchos de los métodos de evaluación de cuencas sólo consideran información general con respecto a las características espaciales de la cuenca. Un buen ejemplo es el modelo del *número de curva* del NRCS (USDA, 1986) que para parametrizar el escurrimiento, únicamente requiere la proporción de los diferentes usos del terreno para cada tipo de suelo.

El método del *número de curva* es sencillo de aplicar a una variedad de cuencas y produce resultados consistentes para categorías de uso del terreno particulares, de ahí su popularidad entre agencias reguladoras. El método se describe a detalle en la sección cuatro del manual del USDA (1986). La primera versión del manual fue impresa en 1954, con subsecuentes revisiones en 1956, 1964, 1965, 1971, 1972, 1986 y 1993 (Ponce y Hawkins, 1996). El método utiliza el *número de curva* para determinar la cantidad y profundidad con que una precipitación dada se infiltra en el suelo, y la cantidad de exceso de precipitación que permanece en la superficie en un área particular. Los números de curva están en un rango entre  $0 < CN \leq 100$ , teniendo al 0 como el límite teórico menor, describiendo una superficie que absorbe toda la precipitación (Swensson, 2003; Zhan y Huang, 2004), lo que puede indicar una mejor recarga de los acuíferos, siendo los suelos áridos un ejemplo de este tipo, y 100 como el límite teórico mayor describiendo una superficie impermeable, donde toda la precipitación se convierte en escurrimiento (Swensson, 2003).

De acuerdo a Auerswald y Haider (1996), una correcta predicción del escurrimiento resulta útil para estimar la transferencia de sustancias disueltas como fósforo o plaguicidas en la superficie de un cuerpo de agua. Zhan y Huang, 2004 y Halley *et al.* (2004), indican que el número de curva es una función de la cobertura y uso del terreno y del grupo hidrológico del suelo (HSG, por sus siglas en inglés), por lo que la vegetación ejerce influencia en la cantidad y profundidad de escurrimiento en un área dada.

Aunque originalmente se desarrolló para el diseño de trabajos de conservación de suelos, el método del *número de curva* ha evolucionado más allá de sus objetivos originales (USDA, 1986); y a pesar de que ha cambiado poco desde los 60s, su popularidad se mantuvo a través de los años debido a su simplicidad y por la disponibilidad de bases de datos requeridos para seleccionar los valores de los parámetros de acuerdo a características físicas de la cuenca (Yu, 1998). Este método requiere pocos parámetros de entrada (SCS, 1972; Auerswald y Haider, 1996), y es ampliamente utilizado debido a su simplicidad, flexibilidad y versatilidad (Melesse y Shih, 2002).

El método del *número de curva* se ha vuelto un procedimiento común en Estados Unidos y en muchos países del mundo y es incorporado en modelos hidrológicos más complejos como SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para predecir el impacto de las prácticas de manejo del terreno en el agua y la producción de sedimento en grandes cuencas variando el tipo de suelo, el uso del terreno y las prácticas de manejo sobre largos periodos de tiempo (Neitsch *et al.*, 2002). De hecho, existe mucha literatura acerca sus orígenes y datos utilizados en el desarrollo del método (Rallison, 1980; Fennessey *et al.*, 2001), de sus deficiencias y limitaciones (Ponce, 1989; Hjelmfelt, 1991; Ponce y Hawkins, 1996), así como de errores al momento de la selección del número de curva (Hawkins, 1975; 1980; Grove *et al.*, 1998). Parece que el amplio uso del método del *número de curva* ha ocurrido principalmente debido a que el método es simple y práctico y porque los valores de los parámetros están relacionados con características físicas de la cuenca. Además, las tablas de los números de curva están

ampliamente disponibles para varios tipos de suelo, uso del terreno, y condiciones del antecedente de humedad, aunado con la proliferación de los Sistemas de Información Geográfica y computadoras con mayor capacidad de cálculo, que permiten determinar el escurrimiento utilizando valores de CN distribuidos en lugar de utilizar condiciones promedio. El método se ha utilizado con éxito por diferentes investigadores (Ragan y Jackson, 1980; Slack y Welch, 1980; Shirmohammadi *et al.*, 1997; Melesse y Shih, 2002; Melesse *et al.*, 2003) para determinar el volumen de escurrimiento a partir de imágenes Landsat, siendo uno de los trabajos más recientes el de Covarrubias (2005) y Berlanga-Robles (2006) que determinan la respuesta del escurrimiento como consecuencia del cambio en la cobertura y uso del terreno en una cuenca del Noroeste de México.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio forma parte de la cuenca A Río San Pedro, sub-cuenca a Río San Pedro, dentro de la región hidrológica RH-11 Presidio – San Pedro, ocupando un área que ha sido estimada en aproximadamente 3080 km<sup>2</sup> (UAN, 2004). Varios municipios del estado de Nayarit forman parte de la sub-cuenca, incluyendo a Acaponeta, Huajicori, El Nayar, Rosamorada, Ruiz, Santiago Ixcuintla y Tuxpan (Fig. 1). La mayor parte de la sub-cuenca está incluida dentro de los municipios de El Nayar y Santiago Ixcuintla. La proporción y área de la sub-cuenca San Pedro que corresponde a cada municipio se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1: Área y porcentaje de la sub-cuenca Río San Pedro.

RH 11	Cuenca	Sub-cuenca	Municipio	Área (Ha)	%
Presidio –San Pedro 946,805 ha	A. Río San Pedro 397,125 ha	a. Río San Pedro. 307,780.09	Acaponeta	44,037.5	14.3
			Huajicori	26,127.6	8.5
			El Nayar	79,451.4	25.8
			Rosamorada	43,188.8	14.0
			Ruiz	43,466.3	14.1
			Santiago Ixcuintla	55,469.5	18.0
			Tuxpan	16,039.1	5.2
			<b>Total</b>	<b>307,780.2</b>	<b>100</b>

Fuente: SOLTA PRUNA 2001 en UAN, 2004.

Considerando el tamaño de la cuenca Río San Pedro ( $\approx 4000$  km<sup>2</sup> en el estado de Nayarit), corresponde a una cuenca grande de acuerdo a la clasificación de Singh (1995). Sin embargo, dado que la sub-cuenca objeto de estudio tiene un tamaño estimado de 3010 km<sup>2</sup>, que representa más del 75% del total de la cuenca, corresponde también a una cuenca grande (mayor de 1000 km<sup>2</sup>), aunque oficialmente es clasificada por INEGI como una sub-cuenca.

El río San Pedro (San Pedro Mezquital) es una de las corrientes más importantes en Nayarit, iniciando en el estado de Durango donde se denomina río La Sauceda, mientras que en Nayarit se le designa con el nombre compuesto San Pedro- Mezquital. Drena un área de 15.6% de la superficie estatal y fluye por el centro de la cuenca, con dirección norte-sur; cambiando su orientación hacia el oeste en la fracción sur de la cuenca, para desembocar en el Océano Pacífico, aunque en su último tramo no presenta un cauce bien definido por formar parte de una zona de lagunas y esteros (INEGI, 1999).

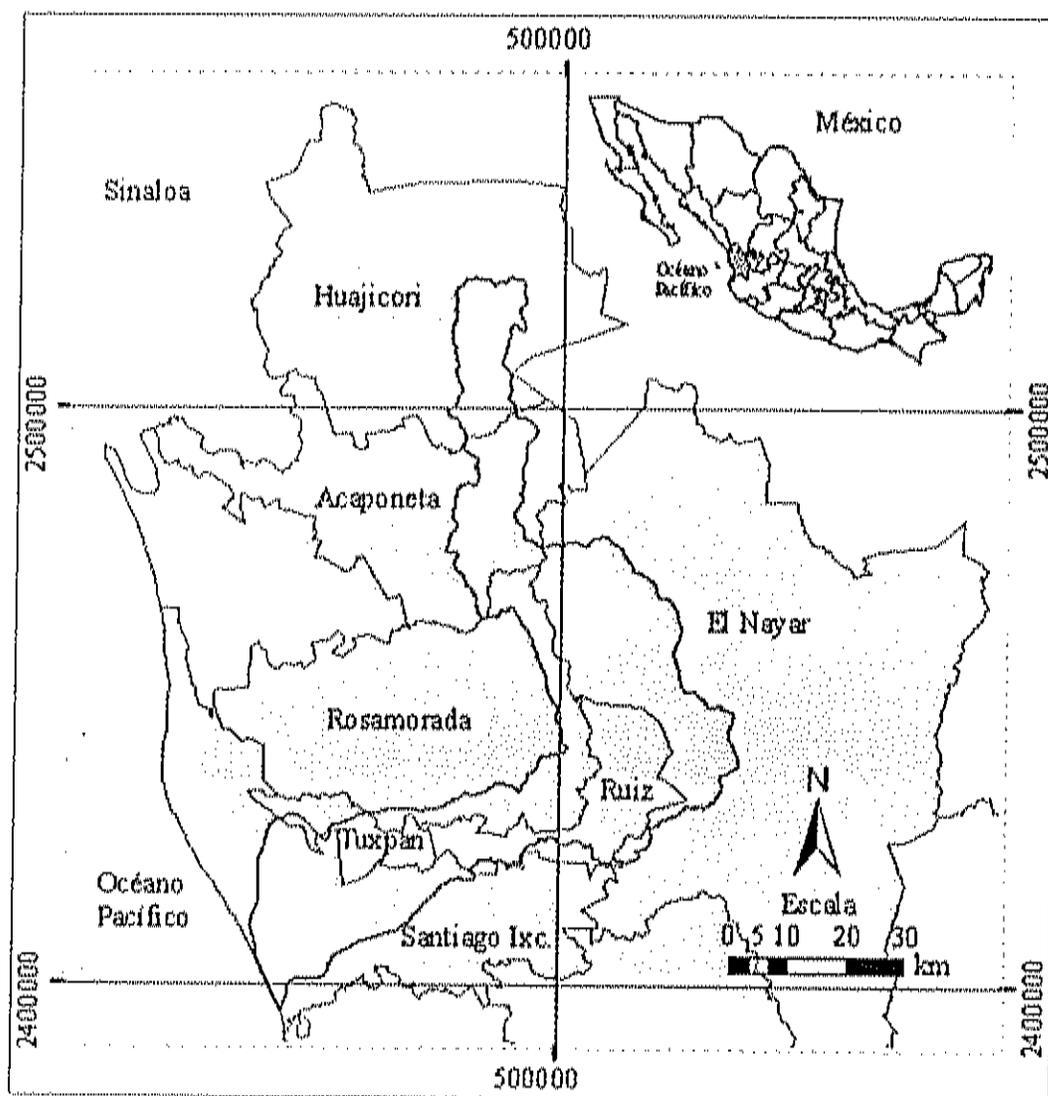


Fig. 1. Localización geográfica del área de estudio, especificando el límite de la cuenca Río San Pedro en el estado de Nayarit, y los municipios que la conforman. Coordenadas en unidades UTM (Zona 13N).

La temperatura media anual varía de 14° a 26° C y la precipitación total anual de 700 a 2000 mm; el volumen medio anual aforado en la estación Hidrométrica "San Pedro" es de 2734.57 millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) y presenta una lámina de escurrimiento de 106 mm, con coeficiente de escurrimiento de 7.9 %. Se localiza una zona de inundación cerca de la desembocadura del río San Pedro, donde hay numerosos esteros y lagunas; entre los primeros destacan: Estero Grande, Las Gallinas, Macho, El Tanque y El Mezcal; de las lagunas sobresale la Grande de Mexcaltitán (INEGI, 1999).

Según la clasificación de **FAO, ISRIC e ISSS (1998)** que utiliza horizontes y características de diagnóstico para la descripción de las unidades de suelo, y de acuerdo con INEGI (2005), se distinguen para la zona, las siguientes unidades (Tabla 2).

**Tabla 2.** Suelos presentes en la zona de estudio de acuerdo a la clasificación de FAO, ISRIC e ISSS.

Tipo de suelo	Características
<i>Cambisol</i>	Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso. También pertenecen a esta unidad algunos suelos muy delgados que están colocados directamente encima de un tepetate.
<i>Feozem</i>	Se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes. Son de profundidad muy variable. Cuando son profundos se encuentran generalmente en terrenos planos y se utilizan para la agricultura de riego o temporal. Los Feozems menos profundos, situados en laderas o pendientes, presentan como principal limitante la roca o alguna cementación muy fuerte en el suelo.
<i>Fluvisol</i>	Son suelos muy poco desarrollados, medianamente profundos y presentan generalmente estructura débil o suelta. Se encuentran en todos los climas y regiones de México cercanos siempre a lechos de los ríos. Presentan capas alternadas de arena con piedras o gravas redondeadas, como efecto de la corriente y crecidas del agua en los ríos.
<i>Leptosol</i>	Se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión son muy variables dependiendo de otros factores ambientales. El uso de estos suelos depende principalmente de la vegetación que los cubre.

<i>Luvisol</i>	La vegetación es generalmente de bosque o selva y se caracterizan por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo. Son frecuentemente rojos o amarillentos, aunque también presentan tonos pardos, que no llegan a ser oscuros. Se destinan principalmente a la agricultura con rendimientos moderados. Son suelos con alta susceptibilidad a la erosión.
<i>Regosol</i>	Tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En general son claros o pobres en materia orgánica, se parecen bastante a la roca que les da origen. Muchas veces están asociados con Leptosoles y con afloramientos de roca o tepetate. Frecuentemente son someros, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad. Se incluyen en este grupo los suelos arenosos costeros.
<i>Solonchak</i>	Tienen alto contenido de sales en todo o alguna parte del suelo. La vegetación típica para este tipo de suelos es el pastizal u otras plantas que toleran el exceso de sal (halófilas). Su empleo agrícola se halla limitado a cultivos resistentes a sales o donde se ha disminuido la concentración de salitre por medio del lavado del suelo. Su uso pecuario depende del tipo de pastizal pero con rendimientos bajos.

### Caracterización Física de la Sub-cuenca

Para propósito del presente trabajo, la caracterización física incluye la descripción de la topografía, evaluación de la composición de suelos y estimación de las características físicas de la sub-cuenca como pendientes, dirección y acumulación del flujo, red de drenaje tipos de cobertura y usos del terreno y estimación de escurrimientos.

El objetivo de esta caracterización y lo que se pretendió desarrollar en este trabajo fue una base de datos de la sub-cuenca Río San Pedro con las principales características físicas, así como determinar el efecto que los cambios de uso del terreno tienen sobre el escurrimiento, así como la respuesta y condición hidrológica de la sub-cuenca.

### Caracterización de la Estructura de Drenaje de la Sub-cuenca

Para delimitar el área de estudio se utilizaron modelos digitales de elevación (MDE) con resolución de 50 metros entre cada punto o escala 1:50,000, generados por INEGI a partir de cartas topográficas de la misma escala. Los archivos se proporcionan en

formato \*.bil, que corresponde a matrices con datos binarios crudos, donde cada celda contiene un valor que representa la altura de ese rasgo del terreno (Fig. 2). Los archivos incluyen datos básicos de referenciación (metadata) como son las dimensiones del Modelo, tipo de datos, proyección cartográfica y el datum geodésico de referencia, entre otros. Los modelos están proyectados en el sistema Universal Transverso de Mercator (UTM), con Datum NAD27 o ITRF92. La cobertura geográfica por cada modelo corresponde a la clave de la carta topográfica (INEGI, 2005).

91	106	124	140	173	189
95	117	138	164	188	200
120	125	153	180	201	209
140	158	138	138	207	210
143	152	140	173	196	201
138	144	148	161	173	190

Fig. 2. Representación en formato raster de un Modelo Digital de Elevación

Para la definición de los límites de la sub-cuenca se siguió una serie de pasos que consisten en la determinación de la dirección de flujo y generación de la red de drenaje, aunque dadas las características de la sub-cuenca, cuya sección terminal es prácticamente plana, se tuvieron que hacer las adecuaciones necesarias a fin de que la red de drenaje extraída de manera automática coincidiera con los ríos representados en las cartas topográficas.

Con el fin de evitar estas inconsistencias, los canales de drenaje pueden ser forzados a lo largo de ríos digitalizados de mapas topográficos mediante la técnica conocida como "Stream Burning", especialmente útil en zonas costeras con terrenos muy planos y otras localizaciones donde el drenaje es dirigido a través de canales

(Maidment, 1996), ya que los ríos delimitados por el MDE se igualan con los digitalizados a partir de mapas.

Aunque existen diferentes aproximaciones para llevar a cabo este procedimiento, en el presente trabajo se utilizó la técnica propuesta por Maidment (1996), que consiste en incrementar el valor de las celdas que caen fuera de los ríos digitalizados asignando un valor arbitrario que fuerce a los ríos delimitados por el MDE para que coincidan exactamente con los digitalizados.

Inicialmente, todos los modelos de INEGI fueron exportados a formato GRID, para ser procesados con el programa ArcView 3.2 y posteriormente fueron recortados y concatenados con técnicas de geoprocésamiento hasta cubrir el área de estudio. Debido a que INEGI no cuenta con el cubrimiento nacional a escala 1:50,000, fue necesario incorporar un MDE con diferente resolución (90 m), disponible en Internet de la página de la Global Land Cover Facility – Universidad de Maryland, correspondiente al path/row 30-45 (DEM3045) del sistema mundial de referencia de Landsat (WRS2).

Una vez completado el mosaico se generó una máscara para excluir al océano y la región con altitudes superiores a 50 m, para considerar sólo la parte de bajo relieve que sería sustituida por el DEM3045 (Fig. 3). Dado que el procedimiento utilizado por INEGI para generar los MDE, utilizando curvas de nivel, genera errores de elevación se hizo necesaria su edición. Celdas con valores mayores de 32,000 en el DEM3045 generalmente correspondían a áreas de ríos y lagunas, por lo que fueron asignadas con valor de 1, considerando al océano con valor de 0 pero que al momento de aplicar la máscara fue eliminado. Finalmente este archivo fue convertido a formato GRID conservando las características del MDE original.

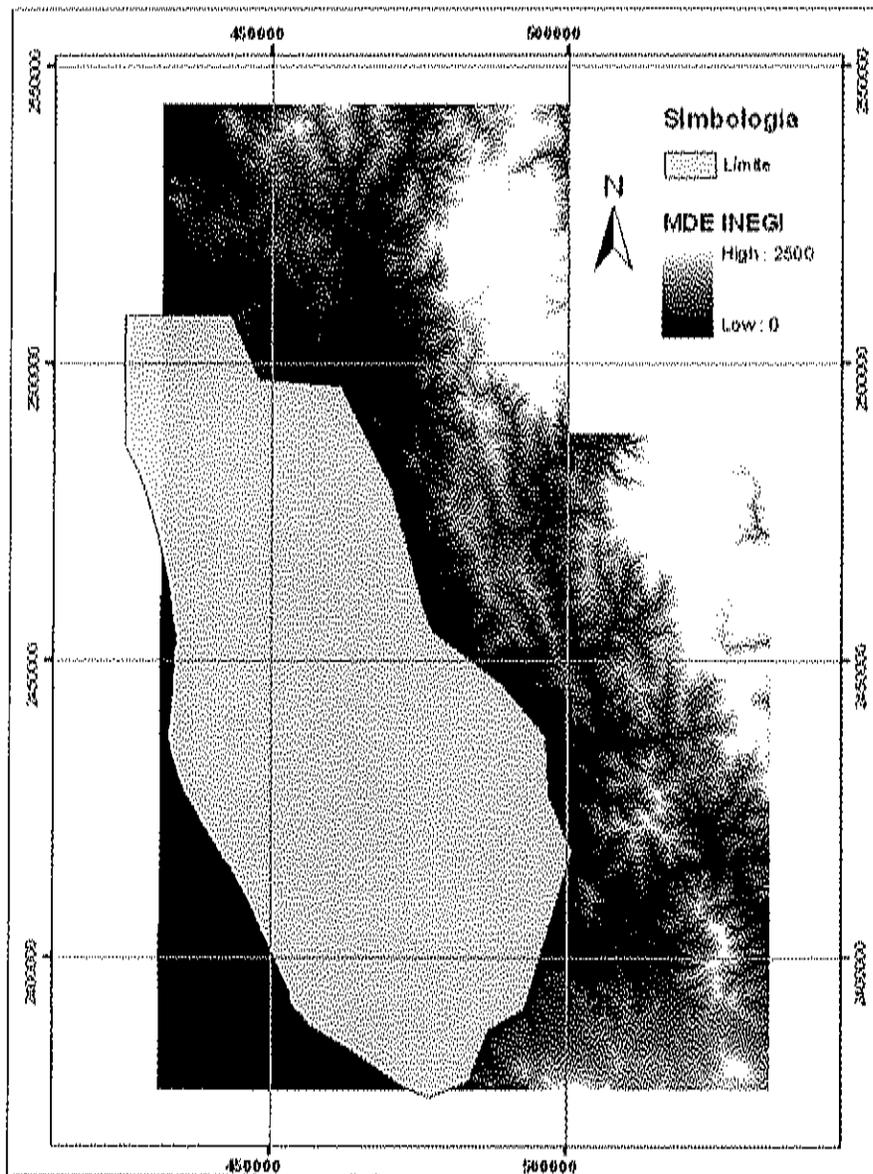


Fig. 3. Límite de la máscara para delimitar el área de bajo relieve en la zona costera de Nayarit.

Los ríos de las cartas topográficas escala 1: 50,000 de INEGI (F13A78, F13A79, F13A88, F13A89, F13C18, F13C19, F13C28, F13C29), fueron digitalizados de acuerdo a este límite considerando sólo aquellos que se encontraban en la parte de bajo relieve (partes del mapa sin curvas de nivel). Las lagunas fueron extraídas por clasificación de las escenas Landsat del año 2000 (path – row 30-45, y 31-45).

Los archivos en formato vector de ríos y lagunas fueron convertidos a formato GRID y fueron fusionados con la función Merge de ArcView GIS 3.2 para tenerlos en un sólo archivo con valores de 1. El archivo de ríos y lagunas fue fusionado con el recorte del DEM3045 considerando como archivo base a los ríos y lagunas.

Dada la diferencia de resolución espacial entre los MDE, el DEM3045 fue convertido a una Red Irregular de Triángulos (TIN) con 3D Analyst en ArcGIS 9.0, con el propósito de interpolar los datos, considerando una exactitud vertical de 0 (Máxima exactitud). El resultado de este procedimiento fue posteriormente exportado a formato raster GRID con una resolución de 50 m. Ya que este modelo debe presentar valores enteros, se utilizó una técnica de truncado para redondear los datos y finalmente fusionarlo con el Mosaico de INEGI dando prioridad al MDE resultante del TIN.

### **Preparación del Modelo Digital de Elevación**

Una vez que se integró el MDE con las adecuaciones efectuadas para cubrir el área total, se procedió a determinar la dirección del Flujo, sin embargo se debe tener en cuenta que un problema inherente en los modelos hidrológicos basados en datos raster es la presencia de depresiones (Jenson y Domingue, 1988), las cuales son áreas rodeadas por valores más altos de elevación, cuyas celdas adyacentes representan elevaciones mayores y consecuentemente no tienen ruta de flujo pendiente abajo a una celda adyacente (Fig. 4). Estas depresiones ocurren en la mayoría de los MDE raster, pero dominan en modelos de limitada resolución para paisajes de bajo relieve (Garbrecht y Martz, 1999). Algunas depresiones son generadas por errores introducidos durante el proceso de generación del MDE, mientras que otras representan características topográficas reales tales como hoyos naturales (Jenson y Domingue, 1988). El resultado es una red de escurrimientos irregulares y definición incompleta del patrón de drenaje, así que se recomienda rellenar esas depresiones antes de seguir procesando el modelo.

La función que permite realizar este proceso es FILL de Spatial Analyst del software ArcGIS 9.0. Para fines del presente trabajo se utilizó la extensión Arc Hydro

Tool para ArcGIS 9.0 del Centro para la Investigación en Recursos Naturales de la Universidad de Texas en Austin. Esta extensión proporciona una serie de herramientas que facilita el análisis que a menudo se lleva a cabo en el área del manejo del recurso agua.

91	106	124	140	173	189
95	117	138	164	188	200
120	125	153	180	201	209
140	158	138	138	207	210
143	152	138	173	196	201
138	144	148	161	173	190

Fig. 4. Matriz representando las depresiones (celdas en gris claro) en un Modelo Digital de Elevación

El siguiente paso es determinar la dirección que tomaría una gota de agua a su paso por cada celda, para lo que se aplicó el algoritmo D8 (*Deterministic eight*), incorporado en varios modelos hidrológicos y de parametrización de cuencas (Jenson y Domingue, 1988; Koka, 2004). El concepto de este método es que cada celda en un MDE se asume que fluye a una de las ocho celdas vecinas de acuerdo a la dirección de la pendiente. La celda es codificada para corresponder a la orientación de una de las ocho celdas que rodean la celda (x) como se muestra en la Fig. 5.

Cuando el procedimiento de dirección de flujo es aplicado a un MDE sin depresiones, todas las celdas tendrán un valor de dirección de flujo definible, debido a que una vez que las depresiones han sido rellenadas, el MDE es condicionado a que cada celda tenga una ruta del flujo hacia el límite del conjunto de datos (Jenson y Domingue, 1988).

La función que permite realizar este paso es FLOW DIRECTION y calcula las ocho posibles direcciones que están determinadas por la pendiente.

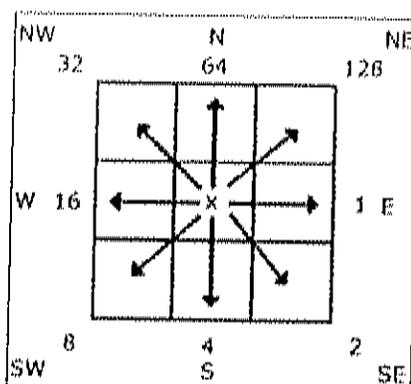


Fig. 5. Representación de las ocho posibles direcciones que se pueden producir durante la determinación de la Dirección de Flujo.

A partir de que se establece la dirección de flujo, estos datos se utilizan para crear los datos de acumulación de flujo, donde a cada celda se asigna un valor igual al número de celdas que fluyen en ella. Las celdas que tienen un valor de acumulación de flujo de cero (ninguna otra celda fluye en ella) generalmente corresponden al modelo de cordilleras. Debido a que todas las celdas en un MDE sin depresiones tienen una ruta hacia el límite o borde de los datos, el modelo formado resaltando las celdas con los más altos valores que algún umbral delimita una red de drenaje completamente conectado. Mientras el valor del umbral es incrementado, la densidad de la red de drenaje disminuye (Jenson y Domingue, 1988). La función que permite realizar este paso es FLOW ACCUMULATION que calcula el flujo acumulado en una celda, que proviene de la suma de los valores de las celdas arriba de ellas.

### Red de Drenaje

La red de drenaje tradicionalmente es obtenida digitalizando manualmente los canales de mapas o fotografías aéreas. Con el incremento de la capacidad de las computadoras y la disponibilidad de los MDE, se han hecho intentos para extraerla del MDE vía programas de cómputo. El método de "umbral constante" fue utilizado para calcular el número de celdas que contribuyen a flujo superficial a cualquier celda en particular. Mientras más

pequeño es el valor umbral, más complicados son los canales obtenidos (Lin *et al.*, 2006).

En este estudio, el valor umbral para que el flujo sea canalizado fue considerado de 100 celdas (alrededor de 25 hectáreas de drenaje). Bajo esta consideración, un límite de 100 significa que para la generación de escurrimiento en una celda dada, necesita tener un atributo mínimo igual o mayor que 100 en el GRID de acumulación de flujo. Este valor fue seleccionado de tal forma que la red extraída coincide con los ríos digitalizados del mapa. La función empleada para determinar la red de drenaje fue STREAM DEFINITION, la cual asigna valor de "1" para las celdas en el GRID de acumulación de flujo que presentan un valor mayor que el valor umbral utilizado para definir los ríos. Todas las demás celdas no contienen datos.

### **Sub-cuencas**

Para algunas aplicaciones hidrológicas, es necesario dividir una cuenca en sub-cuencas definidas por afluentes mayores. Las sub-cuencas también son cuencas pero están referidas en el contexto de que forman parte de una cuenca más grande (Jenson y Domíngue, 1988); están espacialmente relacionadas unas a otras, lo cual significa que el flujo de salida de una cuenca drena a otra sub-cuenca (Neitsch *et al.*, 2002). Por lo tanto, el primer paso en el modelado hidrológico es definir los límites de la sub-cuenca.

El procedimiento es básicamente el mismo para la extracción de la red de drenaje. Para delimitar los límites de las sub-cuencas, definimos un nuevo valor umbral para definir que tan grande deben ser las sub-cuencas. La red de drenaje es segmentada en secciones de ríos, conocido en Arc Hydro como "STREAM SEGMENTATION". Mientras mayor sea el valor umbral, mayor será el tamaño de las unidades hidrológicas. En este trabajo empleamos un valor umbral de 10,000 celdas (área mínima de 25 km<sup>2</sup>).

Otra descripción de la respuesta de la sub-cuenca está basada en el perímetro. Para este propósito, un círculo equivalente es definido como un círculo de área igual a la

de la sub-cuenca. El *índice de compacidad* es la razón del perímetro de la cuenca con la del círculo equivalente (Ponce, 1989). Esto conduce a:

$$K_c = \frac{0.282 P}{\sqrt{A}}$$

Donde  $K_c$  = índice de compacidad,  $P$  = Perímetro de la sub-cuenca, y  $A$  = Área de la cuenca, con  $P$  y  $A$  dados en cualquier conjunto de unidades.

### Estimación del Efecto Producido por Cambios de Usos de Suelo en el Escorrimento en la Sub-cuenca Río San Pedro

En las últimas tres décadas, las tecnologías y métodos de percepción remota han evolucionado dramáticamente lo que ha dado como resultado una colección de sensores operando en un amplio rango de escalas de adquisición de imágenes. Acoplado con la disponibilidad histórica de los datos, la reducción en el costo y el incremento en la resolución de los satélites, la tecnología de la percepción remota tiene un gran impacto en las agencias de planeación involucradas en el monitoreo de cambios en la cobertura y uso del terreno a varias escalas. La percepción remota junto con los datos de GPS (por sus siglas en inglés), y las funciones SIG, proporciona una fuente valiosa de información de cobertura y uso del terreno (Rogan y Chen, 2004).

Uno de los principios fundamentales del manejo de cuencas es el reconocimiento de las interrelaciones entre el uso del terreno, tipo de suelo y el agua. El manejo de cuencas siempre ha requerido la síntesis de un vasto arreglo de información espacial para evaluar los impactos en la boca de la cuenca. Además, es importante conocer no sólo el porcentaje de un uso del terreno dado, sino también su distribución en la cuenca (Guerlín *et al.*, 2000). De acuerdo a Heidinger (2004), la caracterización de las cuencas para propósitos hidrológicos necesita información temática, en particular las clases de cobertura, área de distribución y requiere de información acerca del uso actual del terreno para establecer mecanismos de manejo del agua en una cuenca (USGS, 1997). Por ello se requiere de la selección, procesamiento y de la clasificación de imágenes de

satélite para estimar la extensión y distribución de las principales coberturas y usos del terreno.

El término *cobertura del terreno* relaciona el tipo de característica presente en la superficie terrestre, mientras que el término *uso del terreno* relaciona la actividad humana o función económica asociada con una porción específica del terreno (Sabins, 1999; Lillesand *et al.*, 2004). El uso de esta información representa un avance substancial y es algo común para el análisis de grandes cuencas, pero su utilidad puede ser limitada por su nivel de resolución, errores en la clasificación y precisión limitada dentro de las categorías (USGS, 1997).

Para determinar los tipos de cobertura y uso del terreno del área de estudio se consideraron ocho categorías: Manglar, Marisma, Agricultura (incluye cultivos en pie y campos agrícolas en preparación), Selva (incluye toda la vegetación natural), Suelos desnudos, Agua, Vegetación Secundaria (también es vegetación natural pero en proceso de sucesión), y Zona Urbana (incluye los principales poblados con población mayor o igual a 400 habitantes). Cada una de estas categorías se evaluó para cada una de las tres fechas que se incluyen en el presente trabajo (1973, 1990, y 2000). Las definiciones para las clases utilizadas se mencionan en la Tabla 3.

Tabla 3. Definición de las coberturas y usos del terreno consideradas en el presente estudio.

Cobertura y uso del terreno	Descripción
Agua	Esta clase incluye los cuerpos de agua, como lagunas costeras, esteros y ríos, con excepción del océano. Algunos de los más importantes son la Laguna Grande de Mexcaltitán, la Laguna Toluca y el Río San Pedro.
Mangle	Se distribuye principalmente en la vecindad de de lagunas costeras y desembocaduras de ríos, en donde hay zonas de influencia de agua del mar. Constituida por las especies <i>Rhizophora mangle</i> , <i>Laguncularia racemosa</i> , <i>Avicennia germinans</i> y <i>Conocarpus erectus</i>
Marisma	Se designa aquellas áreas conformadas por suelos salinos con escasa vegetación y cercanas a la costa, donde la superficie de agua está en, cerca de, o sobre la superficie del terreno en la mayor parte del año. Ejemplos de humedales incluyen a los pantanos y marismas situadas en la parte sur de la sub-cuenca.

Agricultura	Incluye a terrenos utilizados con fines agropecuarios, con cultivos en preparación, en pie o en etapa postcosecha. Suelen utilizarse como áreas de agostadero. Prácticamente no existe la agricultura de riego y la actividad está limitada por la humedad del suelo. De acuerdo al Anuario estadístico de la producción agrícola (SAGARPA, 2005), en el municipio de Santiago, Ixcuintla se practican diferentes cultivos, siendo frijol, sorgo y tabaco los más importantes.
Vegetación secundaria	Definida como el terreno donde la vegetación natural predomina en el estrato arbustivo o con plantas no maderables. En esta clase se encuentra aquella vegetación en proceso de sucesión y selva perturbada.
Selva	Representa las áreas provistas con árboles capaces de producir madera y ejercer una influencia en el clima o en el régimen de agua. Esta clase está integrada por las coberturas vegetales correspondientes a selva baja caducifolia, selva mediana sub-caducifolia y selva baja espinosa. Parte del área de estudio se encuentra caracterizada por asociaciones de bosque de encino, bosque de pino-encino, bosque de encino-pino, y bosque de pino. Todas las clases fueron agrupadas bajo una misma denominación.
Suelos desnudos	Son los terrenos en los que menos de una tercera parte del área tiene vegetación u otro tipo de cobertura. También incluye terrenos sin vegetación aparente y expuestos a la erosión. Por sus características incluye a pastizales.
Poblados	Compuesta con la mayor parte del terreno cubierto por asentamientos humanos y calles.

### Selección y Preprocesamiento de las Imágenes

Para hacer el análisis multitemporal del área de estudio, se utilizaron dos imágenes Landsat con path – row: 32-44 y 32-45 para 1973; tres imágenes con path – row: 30-44, 30-45 y 31-45 para 1990; y tres imágenes con los mismos path – row para el 2000. Las imágenes MSS 1973 (del sensor MultiSpectral Scanner) y TM 1990 (del sensor Thematic Mapper) fueron adquiridas entre febrero y mayo durante la época de secas; las imágenes ETM+ 2000 (del sensor Enhanced Thematic Mapper) fueron adquiridas entre Noviembre y Diciembre, que corresponde a finales de la época de lluvias y principio de secas.

Las imágenes MSS fueron geográficamente rectificadas a las imágenes ETM+ con una proyección Universal Transversa de Mercator (UTM zona 13 Norte) basada en la elipsoide de Clarke 1866 utilizando 20 puntos de control, una función de transformación de segundo orden, y el algoritmo de remuestreo del vecino más cercano con un error cuadrado medio (RMS) de 38 m, el cual representa menos de un píxel de error, adecuado para análisis de comparación (Singh, 1989). Para obtener un adecuado registro espacial entre las escenas MSS, TM y ETM+, todas las bandas de las imágenes TM 1990 y ETM+ 2000 fueron geométricamente ajustadas para obtener características similares a las imágenes MSS, con 60 m de resolución espacial. Las escenas fueron enmascaradas y acotadas a los vértices de la sub-cuenca, obtenida por digitalización de la carta hidrológica estatal escala 1: 400000 de INEGI. Cada banda resultante contenía 1469 columnas y 2157 renglones, ajustándose a las coordenadas UTM 444643, 2523917 y 532793, 2394527.

### **Clasificación de las Imágenes**

El objetivo de esta operación es remplazar el análisis visual de la imagen con técnicas cuantitativas para automatizar la identificación de características en una escena. Esto normalmente involucra el análisis de una imagen multispectral y la aplicación de reglas de decisión para designar la cobertura del terreno a la que con mayor probabilidad pertenece cada píxel en una imagen. En resumen, el propósito del proceso de clasificación es categorizar todos los píxeles en una imagen digital en una o varias clases de cobertura del terreno, asociando píxeles con afinidad espectral a una categoría específica (Campbell, 2002; Lillesand *et al.*, 2004). Estos datos categorizados pueden utilizarse para producir mapas temáticos de la cobertura del terreno presente en una imagen y/o producir resumen de estadísticos de las áreas cubiertas por cada tipo de cobertura (Lillesand *et al.*, 2004).

Esto requirió primero la clasificación de manera independiente (por fecha) de cada una de las imágenes (Prenzel y Treitz, 2004), utilizando métodos de clasificación

no supervisados (Chuvieco, 1996; Sabins, 1999; Campbell, 2002) con la ayuda del Software IDRISI Kilimanjaro (Eastman, 2003). La imagen del 2000 fue la primera en ser clasificada debido a que es la imagen para la que se cuenta con información de campo más reciente para validar la exactitud de la clasificación.

### **Evaluación de la Exactitud**

Una vez que la imagen del 2000 fue clasificada, se evaluó la exactitud basada en la matriz de error (conocida también como matriz de confusión) (Congalton y Green, 1999; Lillesand *et al.*, 2004). Este es un arreglo cuadrado con las mismas clases en las columnas y en los renglones, que compara los resultados de la clasificación contra los datos de referencia obtenidos en trabajo de campo, mapas, u otros datos referenciados. Los valores de la diagonal mayor representan la concordancia entre los resultados de la clasificación y los datos de referencia (Congalton y Green, 1999). La exactitud global, la exactitud del usuario y del productor, y el coeficiente de Kappa fueron derivados de la matriz de error.

El primero de los tres métodos, la exactitud global, es obtenida como la suma de la diagonal principal dividida entre el número total de puntos de prueba en la matriz. Utilizando la misma matriz, puede estimarse la exactitud del productor y del usuario para cada categoría. La exactitud del productor es calculada como la proporción del número de unidades de muestreo correctamente clasificadas en una clase dada entre el total de unidades de muestreo asignados a la misma clase en los datos de referencia. La exactitud de usuario es calculada de manera similar, pero las unidades clasificadas correctamente son divididas por el número total de unidades clasificadas en la misma categoría. Ambos valores son maneras de representar exactitudes individuales en lugar de la exactitud global (Congalton y Green, 1999).

Visto como un porcentaje, la exactitud global es una aproximación para determinar el nivel de exactitud de la clasificación, pero debido a que no toma en cuenta los valores positivos causados por el azar, esta medida tiende a sobrestimar la

conveniencia de la clasificación. La exactitud también fue evaluada utilizando el coeficiente de Kappa (K), que en contraste con la exactitud global, incluye en los cálculos los elementos fuera de la diagonal (errores de omisión y de comisión) que son ignorados por la exactitud global. Este índice da elementos estadísticos para asegurar que la clasificación no es producto del azar.

Los datos de referencia utilizados para construir la matriz de error fueron aleatoriamente seleccionados. Las clases Agua y Poblados fueron excluidas de la evaluación de la exactitud, asumiendo que no causan confusión con otras clases. Una vez que la evaluación de la exactitud fue hecha y los indicadores de exactitud alcanzaron valores iguales o superiores al 80%, se aceptó la clasificación como representativa del paisaje analizado, transformándose el número de celdas por clase a área (ha), en función de la resolución espacial o tamaño de píxel (30 m). Finalmente, todos los mapas temáticos fueron convertidos a formato Vector y exportados con una proyección adecuada en archivos de tipo Shapefiles.

El mismo procedimiento se siguió con las imágenes de 1973 y 1990, asumiéndose un error de clasificación con magnitud similar al obtenido para la imagen más reciente.

### **Análisis de Detección de Cambio**

La detección de cambio es el proceso de determinar y/o describir los cambios en la cobertura y uso del terreno basadas en datos multitemporales co-registrados (Rogan y Chen, 2004); involucra el uso de este conjunto de datos para discriminar áreas de cambio de la cobertura entre dos fechas (Sabins, 1999; Lillesand *et al.*, 2004). La premisa básica usando datos de percepción remota para detección de cambio es que el proceso puede identificar cambio entre dos (o más) fechas que no es típico de la variación normal.

Seguido a la clasificación de imágenes de cada fecha, se realizó un análisis multitemporal post-clasificadorio utilizando un algoritmo de detección de cambio (Singh, 1989; Yuan y Elvidge, 1998) para determinar cambios en la cobertura del terreno en los

tres intervalos de tiempo: 1973-1990, 1990-2000, y 1973-2000. Varios investigadores han realizado estudios para monitorear el cambio en la cobertura y uso del terreno en una amplia variedad de ambientes (Singh, 1989). Este análisis puede llevarse a cabo a través de varios métodos, y referencias como Yuan y Elvidge (1998) proporcionan un ejemplo de proyectos de detección de cambio a gran escala. En este estudio se realizó un análisis multitemporal post-clasificadorio que es quizás el procedimiento más común para detección de cambio y ha sido utilizado satisfactoriamente para monitorear el cambio de uso de suelo en la zona costera del Noroeste de México (Ruiz-Luna y Berlanga Robles, 1999; Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002; Ruiz-Luna y Berlanga Robles, 2003; Alonso Pérez *et al.*, 2003).

### **Tipo de Suelos**

El mapa temático de los tipos de suelo se generó a partir de la digitalización de la carta edafológica estatal escala 1: 400,000 (INEGI) de acuerdo a la clasificación **FAO, ISRIC e ISSS** (1998). El mapa resultante se reclasificó en cuatro Grupos Hidrológicos del Suelo (HSG) con base al método del número de curva del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS-CN) (USDA, 1986), para indicar la tasa mínima de infiltración obtenida para el suelo desnudo después de mojarse por un tiempo prolongado. De acuerdo al USDA (1986), la tasa de infiltración es la tasa a la que el agua entra al suelo y es controlada por las condiciones de la superficie. Estos mapas fueron proyectados a una proyección UTM zona 13 Norte para corresponder con las imágenes Landsat. Los cuatro grupos hidrológicos son definidos en la Tabla 4.

Tabla 4: Definición de los grupos hidrológicos de suelos (SCS, 1972; USDA, 1986; Neitsch et al., 2002; Halley et al., 2004).

Grupo Hidrológico	Características del grupo de suelos
A	Suelos con tasas altas de infiltración (bajo escurrimiento), incluso cuando están completamente mojados y consisten principalmente de arenas y gravas profundas y excesivamente drenadas (arena, arena arcillosa, o marga arenosa). Estos suelos tienen una tasa alta de transmisión de agua. Su tasa de infiltración es $> 7.6$ mm/h cuando está mojado.
B	Suelos con una moderada tasa de infiltración (moderado escurrimiento) incluso cuando están completamente mojados y consisten principalmente de suelos profundos a moderadamente profundos, de texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas (marga de cieno o marga). Estos suelos tienen una moderada tasa de transmisión de agua. Su tasa de infiltración es de 3.8 a 7.6 mm/h cuando está mojado.
C	Suelos con tasas de infiltración bajas (de moderado a alto escurrimiento) cuando están completamente mojados y consisten principalmente de suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua, o suelos con texturas moderadamente finas a finas (marga de arena arcillosa). Estos suelos tienen una tasa baja de transmisión de agua. Su tasa de infiltración es de 1.2 a 3.8 mm/h cuando está mojado.
D	Suelos con una tasa baja de infiltración (alto escurrimiento) cuando están completamente mojados y consisten principalmente de suelos de arcilla con un alto potencial de inflamamiento, suelos con una permanente capa superior de agua, suelos con una capa de arcilla en o cerca de la superficie, y suelos poco profundos sobre material casi impermeable (marga de arcilla, marga de arcilla de sedimento, arena arcillosa, arcilla de sedimento, o arcilla). Estos suelos tienen una tasa muy lenta de transmisión de agua. Su tasa de infiltración es de 0 a 1.2 mm/h cuando está mojado.

### Escurremiento

El método del número de curva (CN) del NRCS es descrito en detalle en el NEH-4 (SCS, 1972). La mayoría de los parámetros que afectan el escurrimiento están incorporados en este modelo. Algunos estos parámetros son determinados mediante percepción remota (Sharma *et al.*, 2001). La ecuación del NRCS para determinar el escurrimiento es:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}$$

Donde

Q = Esgurrimiento (pulgadas)

P = Precipitación (pulgadas)

S = Potencial máximo de retención después de que el escurrimiento empieza (pulgadas)

I<sub>a</sub> = Abstracción inicial (pulgadas)

La abstracción inicial (I<sub>a</sub>) representa toda la pérdida antes de que el escurrimiento empiece. Incluye agua retenida en depresiones de la superficie, agua interceptada por la vegetación, evaporación, y la infiltración. I<sub>a</sub> es altamente variable pero generalmente está correlacionada con los parámetros de cobertura del terreno y el tipo de suelo. Para eliminar la necesidad de estimar I<sub>a</sub> y S en la ecuación anterior, la relación entre ambos parámetros fue desarrollada analizando datos de precipitación – escurrimiento para muchas cuencas pequeñas. La relación empírica es:

$$I_a = 0.2S$$

Removiendo I<sub>a</sub> como un parámetro independiente, esta aproximación permite el uso de una combinación de S y P para producir una cantidad única de escurrimiento. Sustituyendo la anterior ecuación en la fórmula inicial se tiene:

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

Donde S o potencial máximo de retención está relacionado con el tipo de suelo y la condición de la cobertura de la cuenca por medio del CN, cuyo valor fluctúa entre 0 y 100, asociándose los valores más bajos a suelos saturados de humedad y que se relaciona con S por medio de la función:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (\text{Pulgadas})$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{Milímetros})$$

El CN es un índice de escurrimiento adimensional basado en el Grupo Hidrológico del Suelo (HSG), uso del terreno, condiciones hidrológicas y la condición del antecedente de humedad (AMC) (USDA, 1986; Melesse y Shih, 2002). Los números de curva describen el potencial de una superficie para generar escurrimiento como una función del tipo de suelo y uso del terreno presente en la superficie terrestre.

El escurrimiento fue calculado basado en el método del Número de Curva del NRCS (SCS, 1972). Las clases Agrícola y Selva, originalmente definidas como clase única fueron reclasificadas para generar tres sub-clases de condición (Buena, Regular y Pobre) en función de sus firmas espectrales.

Los mapas de cobertura del terreno y tipo de suelo fueron agregados a ArcGIS y procesados con la herramienta ArcCN-Runoff (Zhan y Huang, 2004). Estas capas fueron intersectadas para generar una nueva capa de polígonos más pequeños asociados con las coberturas de Grupos Hidrológicos y Uso del terreno. De acuerdo a Zhan y Huang, (2004), este paso conserva todos los detalles de la variación espacial, y es considerado más exacto que usar datos en formato raster para determinar el número de curva.

El número de curva fue asignado a cada polígono de acuerdo a su grupo hidrológico y uso del terreno (Tabla 5). El nombre de las coberturas del terreno fue igualado a aquellas de la tabla índice en la base de datos del número de curva de ArcCN-Runoff (Zhan y Huang, 2004).

Tabla 5. Categorías de uso de suelo y su número de curva asociado considerado en este estudio.

Descripción	Número de curva por grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Manglar	0	0	0	0
Marisma	0	0	0	0
Agua	0	0	0	0
Poblados	57	72	81	86
Vegetación secundaria	35	56	70	77
Suelo desnudo (Pastizal)	39	61	74	80
Selva (Pobre)	45	66	77	83
Selva (Regular)	36	60	73	79
Selva (Bueno)	30	55	70	77
Agrícola (Pobre)	77	86	91	94
Agrícola (Regular)	76	85	90	93
Agrícola (Bueno)	74	83	88	90

Los datos de precipitación utilizados para el análisis fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional. Un total de once estaciones fueron seleccionadas para cubrir el área de la sub-cuenca río San Pedro. Se calculó la precipitación promedio de un evento típico de precipitación para 1973, 1990 y 2000 considerando un antecedente de precipitación de 10 años y aquellos eventos de no menos de 25.4 mm (1 pulgada) (USDA, 1986). El valor de P calculado para un evento típico fue 53.1 mm (2.09").

#### Determinación de las Unidades de Respuesta Hidrológica

Se han hecho varios estudios para incorporar el SIG en el modelado hidrológico de cuencas. Estos estudios tienen diferentes alcances, siendo la identificación de *unidades de respuesta hidrológica* (URHs) (Flügel y Lüllwitz, 1993; Flügel, 1995a; 1995b;

Flügel, 1997), una contribución del SIG para identificar áreas de una cuenca que tienen respuestas hidrológicas similares (Melesse y Shih, 2002).

Las URHs son regiones dentro de una cuenca que tienen dinámicas hidrológicas relativamente homogéneas comparadas con sus URHs vecinas debido a su tipo de uso de suelo uniforme, geología, suelo, topografía y precipitación (Flügel y Lüllwitz, 1993; Leavesley *et al.*, 2002). Particionar la cuenca en URHs mejora la capacidad para integrar la variación espacial y temporal de las características climáticas y físicas de la cuenca (Flügel y Lüllwitz, 1993) y por lo tanto pueden entenderse como entidades del modelado que son utilizadas por preservar la heterogeneidad espacial dentro de los modelos hidrológicos (Flügel, 1996). De acuerdo a Morad y Triviño (2001), sencillamente son áreas con un mismo comportamiento y capacidad de respuesta ante las precipitaciones.

Considerando que la pendiente juega un papel importante en la producción de escurrimiento, se tomó a esta variable como el factor primario y a la cobertura y uso del terreno como factor secundario para la definición de URHs. La pendiente fue derivada de MDEs (50 x 50 m), y fue ordenada en 4 clases:

- 1 Pendientes entre 0 – 10°
- 2 Pendientes entre 11 – 20°
- 3 Pendientes entre 21 – 40°
- 4 Pendientes mayores de 41°

Para este análisis y en función de sus características de escurrimiento, las clases de uso de suelo agua, marisma y manglar fueron consideradas como una sola: Humedales. No se incluyó un mapa de precipitación en el análisis ya que se consideró la precipitación promedio de manera uniforme en toda la sub-cuenca atendiendo a lo propuesto por Flügel (1996), que asigna la precipitación diaria promedio para cada URH. Mediante técnicas de geoprocésamiento utilizando la función INTERSEC en ArcGIS 9.0 fueron intersectadas las capas Pendiente y Uso del suelo. Posteriormente se sobrepuso el mapa resultante con los grupos hidrológicos para finalmente calcular el

escurrimiento de cada uno de los nuevos polígonos generados. Las Unidades de Respuesta Hidrológica sólo fueron determinadas para el 2000, ya que los mapas de pendiente, tipo de suelo, grupo hidrológicos, y la precipitación para determinar el escurrimiento son iguales para cada fecha de estudio.

### Integración del Sistema de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica describen la idea de presentar espacialmente datos geográficos. Estos datos, referidos como atributos, pueden incluir valores de elevación de la superficie, cobertura del terreno, densidades de población, y casi cualquier tipo de información distribuida espacialmente.

Dado que toda la información se manejó en formato digital, las capas generadas en los análisis anteriores (Cobertura y uso del terreno, Tipos de suelo, Escurrimiento, Dirección y acumulación de flujo, Red de drenaje, Cuencas hidrológicas, Pendiente, y Aspecto) se integraron en un Sistema de Información Geográfica con plataforma ArcGIS 9.0 (Fig. 6).

Para la integración de los resultados, los mapas temáticos resultantes de la clasificación de cobertura y uso del terreno para cada una de las fechas, fueron exportadas como archivos de vectores tipo Shapefiles, manteniendo sus características espaciales. Los mapas resultantes de la digitalización (tipos de suelo) que originalmente se encontraban en formato dxf, fueron convertidos a este tipo de formatos. En todos los casos, se generó un archivo de documentación, donde se almacena la información con respecto a su referencia geográfica. Este diseño permitió un manejo más flexible de la información, una vez que son generadas capas individuales que pueden ser analizadas y manipuladas con diversos fines.

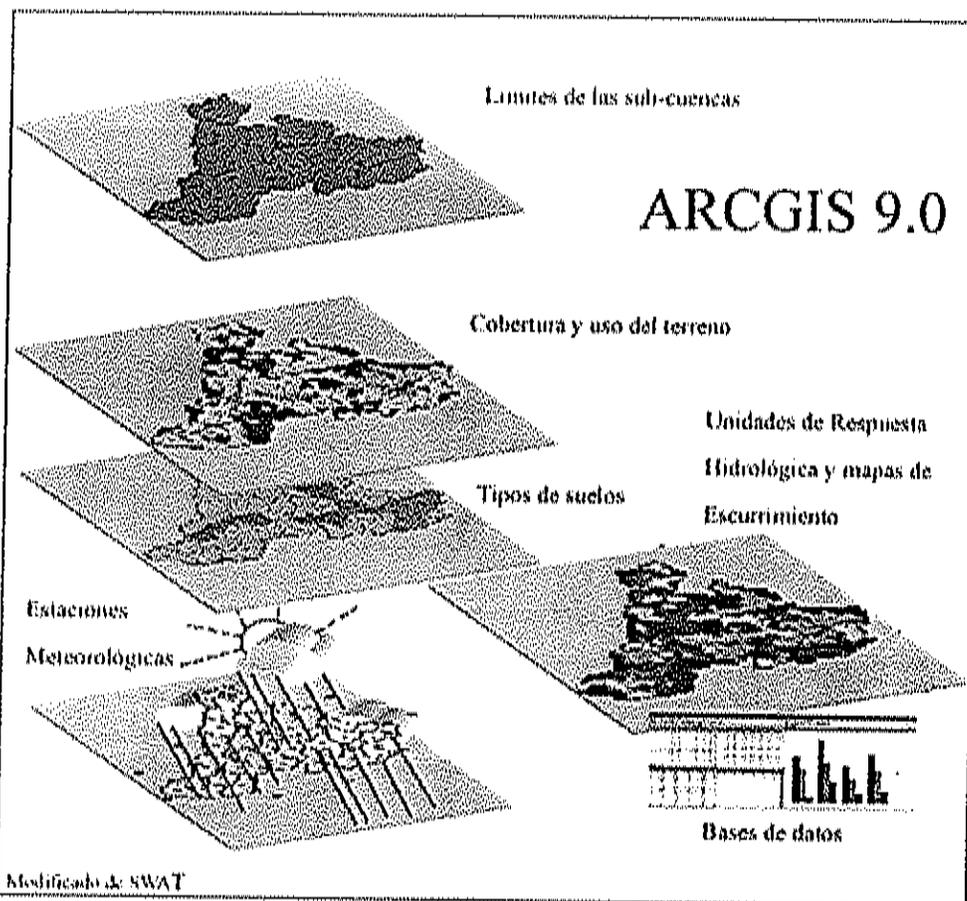


Fig. 6. Capas que constituyeron el Sistema de Información Geográfica para la Sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit.

---

 RESULTADOS Y DISCUSIÓN
 

---

Datos Meteorológicos

Con respecto a este apartado se hace referencia a los datos de precipitación utilizados para el análisis, mismos que fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y corresponden a un total de once estaciones meteorológicas, seleccionadas con base en el área que cubre la sub-cuenca Río San Pedro. Los principales datos de identificación de estas estaciones, su localización y el periodo de registro son especificados en la Tabla 6 y la localización de las estaciones meteorológicas utilizadas en este análisis tanto próximas como dentro del área de estudio se muestra en la Fig. 7. Los datos se presentaron en formato tabular y para algunas estaciones cubren desde 18 a más de 50 años, a partir de 1946. A menudo el conjunto de datos conteniendo la variable observada de una estación dada estaba incompleto debido a cortas interrupciones en la observación, sin embargo se desconocen las causas de la interrupción.

**Tabla 6.** Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.

Código	Estación	Municipio	Coordenadas UTM		Periodo	Años
			x	y		
18004	Capomal	Santiago Ixcuintla	487944.90	2416228.80	1957-2001	44
18007	Cucharas	Huajicori	481122.98	2471579.38	1967-2000	33
18022	Mexcalitán	Santiago Ixcuintla	450074.63	2421836.99	1969-2000	32
18025	Paso de Arocha	Santiago Ixcuintla	486221.22	2414385.42	1949-2001	52
18026	Puerto de Platanares	Ruiz	503442.67	2423603.60	1966-2001	35
18032	San Pedro	Ruiz	484515.05	2430989.76	1946-2001	55
18034	Santiago Ixcuintla	Santiago Ixcuintla	477606.78	2412550.54	1951-1997	46
18068	Pajaritos	Acaponeta	496568.66	2475257.94	1978-2001	23
18076	Los Corchos	Santiago Ixcuintla	451723.64	2397849.69	1981-1999	18
18084	Mesa de Pedro Pablo	Huajicori	472621.42	2515869.92	1982-2001	19
18085	El Naranjo	Ruiz	505155.60	2449430.87	1982-2000	18

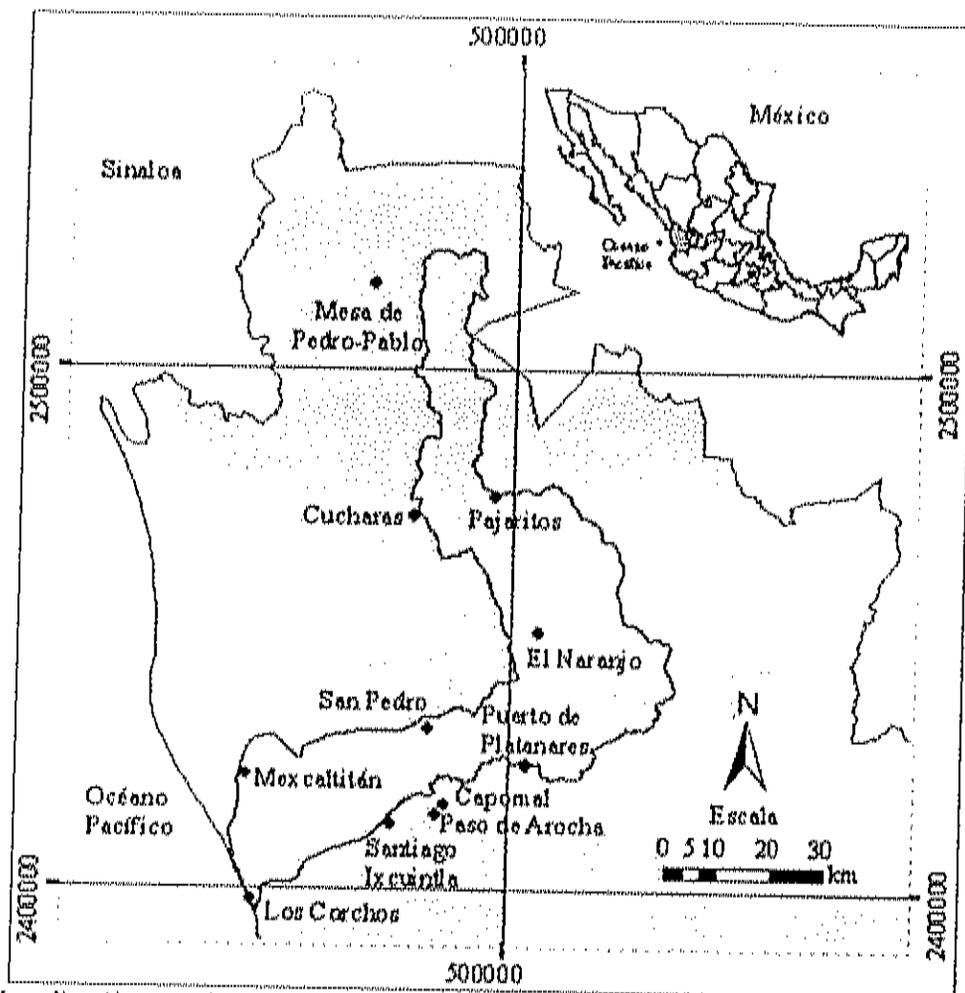


Fig. 7. Localización geográfica de once estaciones meteorológicas (•) dentro y fuera de la sub-cuenca Río San Pedro, Nay.

### Caracterización de la Estructura de Drenaje de la Sub-cuenca

#### **Sub-cuencas**

Aunque los límites de las cuencas y sub-cuencas del país están generados por el INEGI, la mayoría de los modelos de precipitación-escorrentía alcanzan su mayor precisión en las cuencas más pequeñas y de tamaño medio, por lo que resulta útil dividir la cuenca principal (en este caso la subcuenca del Río San Pedro) en sub-unidades o sub-cuencas. Considerando esto, se llevó a cabo la identificación de los límites de la sub-cuenca, de

manera independiente al modelo de INEGI, utilizando la función CATCHMENT GRID DELINEATION, que permitió la delimitación automática de 58 unidades dentro del área de estudio. Esta herramienta SIG no sólo proporcionó el área total de la zona de estudio (2886 km<sup>2</sup>), que difiere ligeramente de la extensión proporcionada por la UAN (2004), de aproximadamente 3080 km<sup>2</sup>, pero además se obtuvieron estimaciones del área individual de las su-cuencas (Tabla 7), así como los límites de estas unidades (Fig. 8) e información básica de las características de la sub-cuenca para la posterior delimitación de Unidades de Respuesta Hidrológica.

Tabla 7. Área, perímetro (P) e índice de compacidad (Kc) de cada una de las sub-cuencas.

ID	Área (Ha)	P	Kc	ID	Área (Ha)	P	Kc
1	15030	83900	1.93	30	1269	20500	1.62
2	3183	36500	1.82	31	57	5300	1.99
3	23916	127300	2.32	32	7742	55300	1.77
4	9549	71700	2.07	33	297	9300	1.52
5	793	17800	1.78	34	3027	33400	1.71
6	6898	55100	1.87	35	5724	47300	1.76
7	91	6100	1.80	36	5788	50100	1.86
8	4168	49000	2.14	37	5758	45900	1.71
9	238	8400	1.53	38	2781	43800	2.34
10	4912	48300	1.94	39	15227	159800	3.65
11	2516	29300	1.65	40	5695	50300	1.88
12	12436	69300	1.75	41	7434	50500	1.65
13	6495	53000	1.85	42	5958	74800	2.73
14	7222	60700	2.01	43	5491	65400	2.49
15	7265	52500	1.74	44	7284	62100	2.05
16	472	11700	1.52	45	1998	42100	2.66
17	474	13100	1.70	46	3933	47800	2.15
18	427	11300	1.54	47	4528	74700	3.13
19	2539	37900	2.12	48	506	16600	2.08
20	4600	42900	1.78	49	11144	84700	2.26
21	4600	48700	2.02	50	3173	48500	2.43
22	2490	28800	1.63	51	6051	94000	3.41
23	3200	35400	1.76	52	6074	73400	2.66
24	9232	61800	1.81	53	2856	53600	2.83
25	7752	61900	1.98	54	6519	79700	2.78
26	7960	55300	1.75	55	264	11200	1.94
27	4102	36000	1.59	56	1836	38400	2.53
28	3078	33800	1.72	57	3507	55100	2.62
29	198	8800	1.76	58	880	59400	5.65

Las sub-cuencas producidas se ubicaron dentro de un intervalo de 57 a 23,916 ha, con un tamaño medio de aproximadamente 5000 ha o 50 km<sup>2</sup>, lo que de acuerdo a la clasificación citada en Moharana y Shih (2002) corresponde a minicuencas.

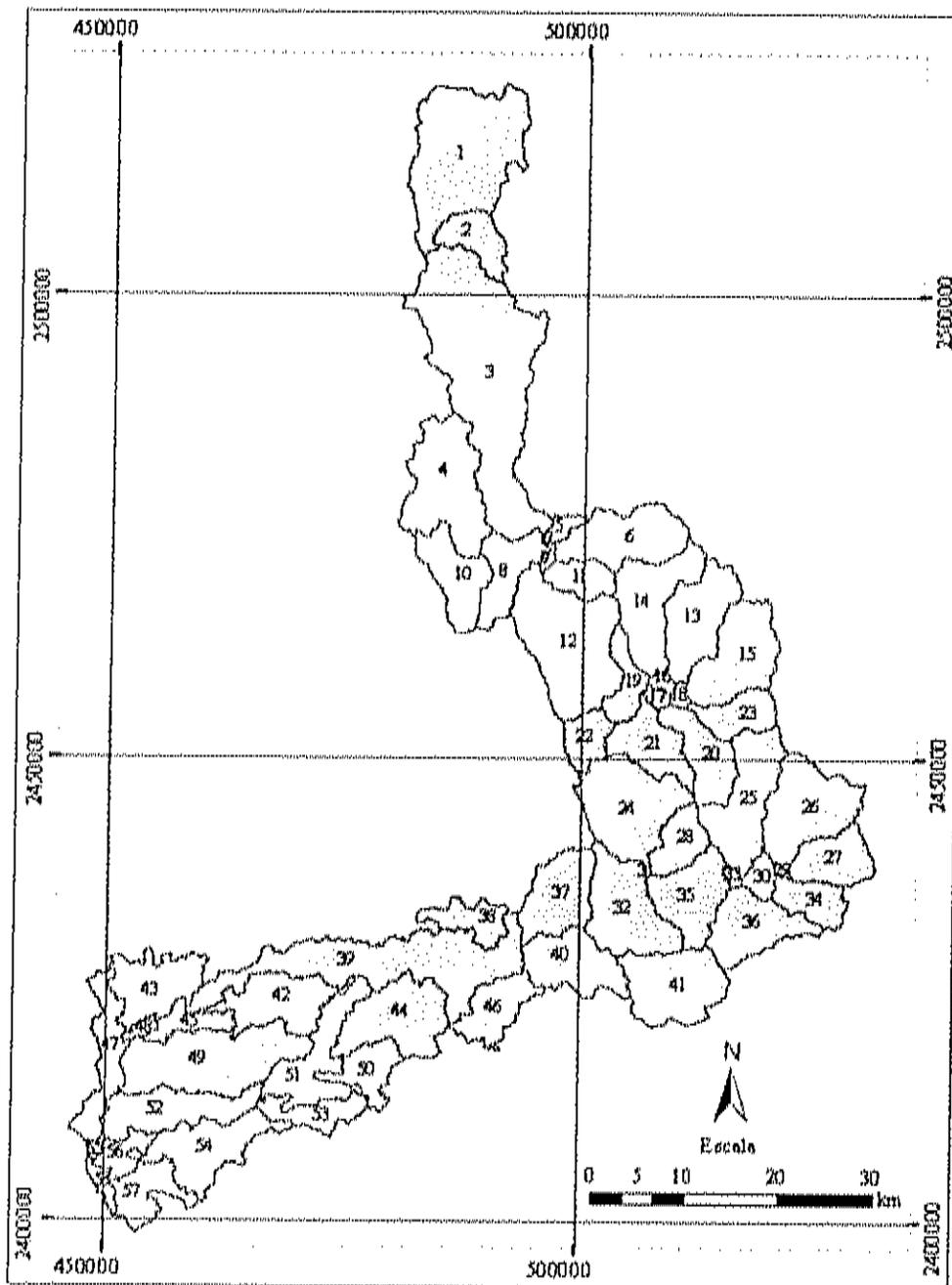


Fig. 8. Sub-cuencas obtenidas a partir del Modelo Digital de Elevación.

Siguiendo el mismo criterio, 4 de las 58 unidades pueden ser clasificadas como microcuencas ( $<2.5 \text{ km}^2$ ), 5 unidades corresponden a la denominación de minicuenca, ( $>2.5 < 5.0 \text{ km}^2$ ), 24 corresponderían al criterio definido como sub-cuenca y las 25 restantes corresponderían a cuenca. Conforme a la propuesta de Singh (1995), 53 cuencas en este estudio pueden considerarse como pequeñas con área de  $100 \text{ km}^2$  o menos, mientras que aquellas con área de  $100$  a  $1000 \text{ km}^2$  son consideradas como medianas (5 en el presente trabajo). Las cuencas grandes, definidas como aquellas con área mayor de  $1000 \text{ km}^2$  no están representadas de manera individual en el presente estudio, sin embargo el conjunto supera esta superficie.

El área de la cuenca o área de drenaje, es quizás su propiedad más importante ya que determina el potencial del volumen de escurrimiento. En general, cada sub-cuenca tiene sólo un canal principal, de tal forma que mientras más grande es esta unidad, más grande es la cantidad de escurrimiento y consecuentemente, mayor potencial de flujos superficiales.

A gran escala, los datos modelados utilizando un MDE son representativos de la estructura real de drenaje de una cuenca, pero a una pequeña escala, un ajuste perfecto entre estos datos y las características reales del terreno nunca es obtenida (Tribe, 1992 en Turcotte *et al.*, 2001). Por ejemplo, la estructura de drenaje modelada utilizando un MDE es difícil que se ajuste con la estructura real de drenaje en áreas planas. Además, por definición un MDE no contiene información acerca de lagos, por lo que no es posible determinar si un área dada de igual elevación es un lago o un área plana, donde posiblemente fluye un río.

Para el presente trabajo, el área modelada de 288,637 hectáreas, representó una diferencia menor del 1%, con respecto a los límites oficiales proporcionados por INEGI de 289,627 hectáreas. Esta diferencia puede deberse a que el área oficial fue evaluada manualmente utilizando la carta hidrológica escala 1:400,000, mientras que en el presente caso la mayor parte de la información corresponde a datos en escala 1:50,000, por lo que es probable que haya discordancias considerando los errores típicos asociados

con la digitalización. Valores de error menores de 1% fueron obtenidos por Turcotte *et al.* (2001) para una cuenca en Québec utilizando un MDE modificado con una red digital de ríos y lagos (DRLN) y basados en algoritmos estándares del D8. De acuerdo a estos autores, esta aproximación permitió un ajuste exacto entre la DRLN y la estructura de drenaje modelada, pudiendo esta última claramente representar la localización de lagos.

Con respecto a la *respuesta de la cuenca*, que se refiere a la concentración relativa y tiempo de escurrimiento y que puede ser estimada en función del índice de compacidad ( $K_c$ ), se obtuvieron valores del  $K_c$  entre 1.52 (ID 16 con 472 ha) y 5.65 (ID 58 con 880 ha). Lo anterior indica que todas las unidades definidas dentro de la sub-cuenca pueden presentar una respuesta hidrológica retardada, ya que cuando  $K_c$  es cercano a 1, la respuesta hidrológica es rápida, mientras que un  $K_c$  mucho más grande que 1 describe una cuenca con una retardada respuesta al escurrimiento (Ponce, 1989).

### Red de drenaje

De acuerdo con los métodos empleados se determinó que la sub-cuenca presenta un patrón de drenaje dendrítico, caracterizado por numerosos y pequeños tributarios que se unen en un ángulo agudo con uniones en Y a arroyos de mayor jerarquía, formando eventualmente los ríos más grandes. La red de drenaje se muestra en la Fig. 9.

La definición de órdenes de corriente, así como la red de drenaje en un área problemática, misma que corresponde al área de la Laguna Grande de Mexcaltitán al sur de la cuenca se muestran en la Fig. 10. Se utilizó el método de Strahler (1957) para jerarquizar los órdenes de corriente, en donde la longitud de cada corriente es indicada por su orden. Una corriente de primer orden es un tributario sin ramificaciones; una corriente de segundo orden es un tributario formado por una o más corrientes de primer orden, y así sucesivamente. El orden se incrementa sólo cuando corrientes del mismo orden se intersectan; por lo tanto, cuando corrientes de primer y segundo orden se encuentran, el resultado será uno de segundo orden, en vez de tercer orden (Khan *et al.*, 2001). Morfométricamente, las corrientes de menor orden son dimensionalmente más

cortas, acarreado menor volumen de agua, mientras que las de mayor orden son comparativamente más largas y acarrearán más agua y sedimentos.

Bajo esta premisa, los resultados de este estudio muestran que la sub-cuenca Río San Pedro pertenece a una sub-cuenca de Séptimo orden (Fig. 10A) utilizando los modelos digitales de elevación escala 1:50,000 para el área de estudio. El orden de magnitud podría ser mayor dado que la sub-cuenca recibe el aporte de la sub-cuenca Río Mezquital por lo que los resultados deben considerarse sólo como una aproximación.

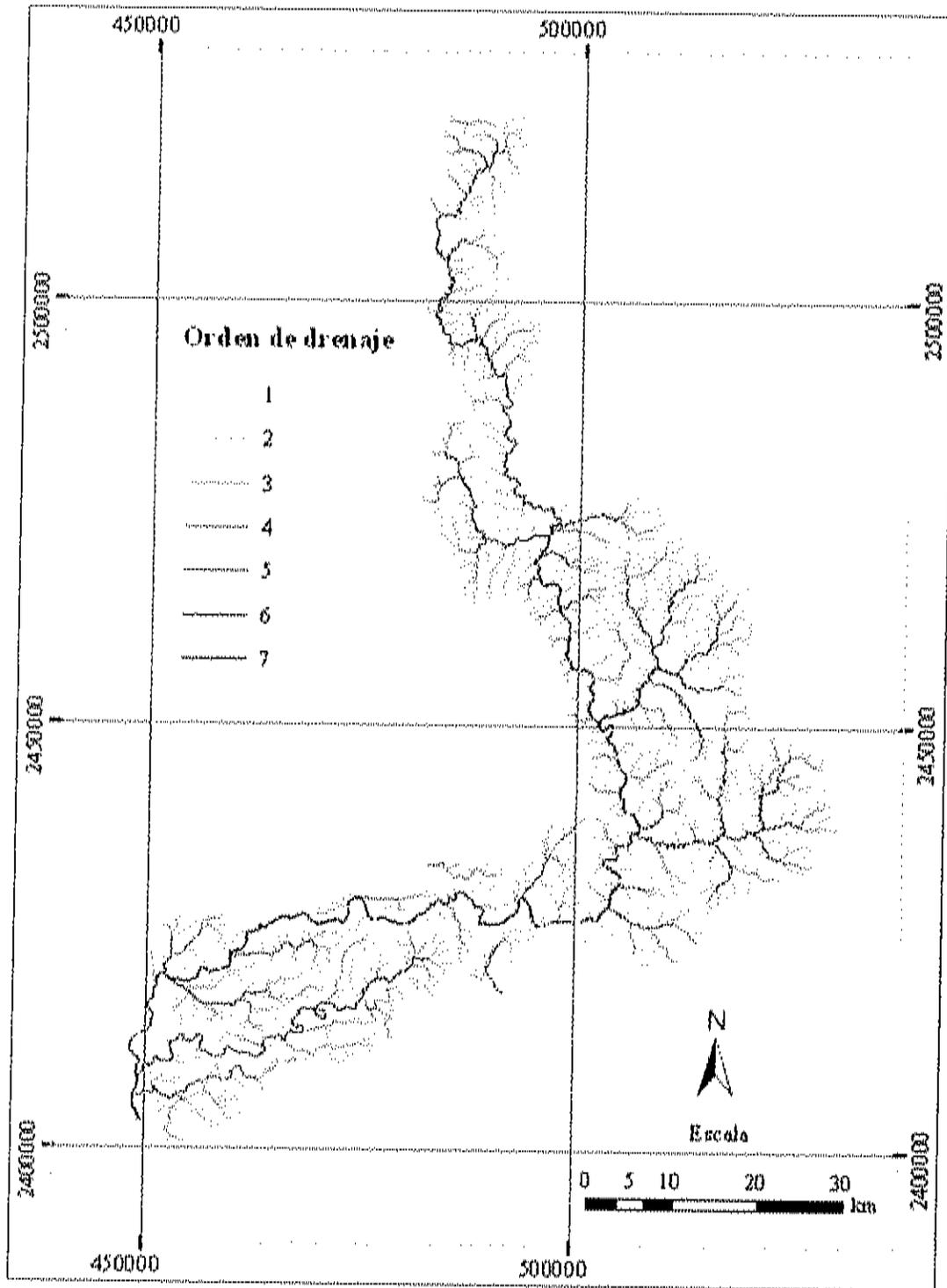


Fig. 9. Limite de la sub-cuenca Río San Pedro. Red d y Orden de drenaje a partir de modelos digitales de elevación. Los órdenes de mayor magnitud corresponden al río San Pedro y sus tributarios principales.

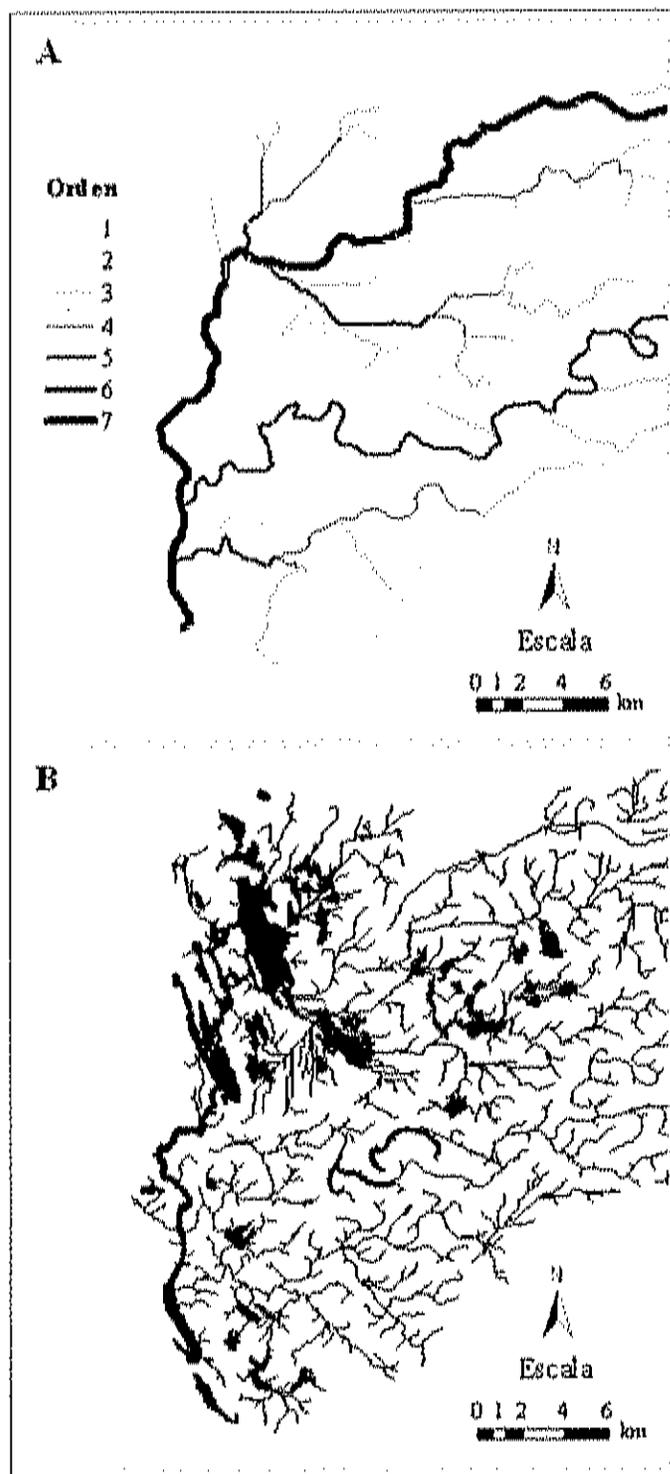


Fig. 10. Red de drenaje en la parte sur (boca) de la sub-cuenca. A) Orden de drenaje y B) Red modelada de un área problemática con lagunas y cuerpos de agua de la sub-cuenca Río San Pedro, Nay.

Dada la complejidad de la cuenca y debido a la presencia de una importante proporción de zonas planas, fue necesaria la determinación de direcciones de flujo sobre estas áreas mediante una evaluación de rutas de flujo artificiales, definidas arbitrariamente. En la Fig. 10B, la dirección de flujo en la parte sur de la sub-cuenca (boca) indica las limitantes de utilizar el algoritmo D8, definido en métodos, ya que en zonas planas produce muchos segmentos de ríos paralelos. A esta parte se le sobrepuso el área de lagunas y cuerpos de agua en la sub-cuenca Río San Pedro, e ilustra lo inadecuado de utilizar el D8 para delimitar lagos y lagunas. Turcotte *et al.* (2001) mencionan que parece imposible determinar la dirección de flujo en áreas planas utilizando solamente un MDE, particularmente usando solamente el método D8, que no permite igualar exactamente la red modelada y la red actual de drenaje. La representación de las direcciones de flujo usando sólo ocho posibles direcciones implica que sólo estas ocho direcciones sean utilizadas para aproximar las direcciones de flujo continuo. Así, un modelado exacto de la red de drenaje sobre estas áreas es imposible (Turcotte *et al.*, 2001), sin embargo estos errores no pueden ser eliminados mediante la utilización de un mejor modelo o por una disminución en el tamaño del GRID.

Wang y Yin (1998) reportan que esta causa de errores puede estar relacionada a la falta de variación topográfica en ciertas localizaciones de una cuenca, principalmente referida a regiones de bajo relieve o en grandes valles, así como con la deficiencia de las funciones de análisis hidrológico de los programas de cómputo. Mientras la función FLOW DIRECTION asigna direcciones de flujo para cada celda a una de las ocho celdas adyacentes de acuerdo a la dirección de la descendente de la pendiente, varios estudios han indicado que una sola dirección del flujo no refleja la dirección en el mundo real (Quinn *et al.*, 1991; Tarboton, 1997; Wang y Yin, 1998). Esto significa que en realidad en agua no está limitada a sólo ocho posibles direcciones, sino que puede ser representado como una cantidad continua entre 0 y  $2\pi$ .

Los errores asociados con áreas planas no son, en principio, fundamentales ya que pueden ser eliminados con un MDE más exacto. Sin embargo, en un contexto operacional, los modelos normalmente no alcanzan tal nivel de definición, por lo que las

áreas planas representan superficies problemáticas. Problemas relacionados al tratamiento de áreas planas han sido estudiados extensivamente por Martz y Garbrecht (1998) y Garbrecht y Martz (1997; 1999). Estos autores presentan un nuevo algoritmo que modifica las superficies planas para producir patrones de drenaje topográficamente consistentes y más reales que los proporcionados por métodos tradicionales. Este algoritmo está basado en el D8 y resuelve el problema de identificación de drenaje sobre áreas planas incrementando la elevación de las celdas en estas superficies para imponer dos gradientes: uno hacia la parte alta y otro fuera de la superficie plana hacia la parte más baja.

Tradicionalmente, la delimitación de cuencas requiere de una labor intensiva y también el acceso a una extensiva biblioteca de mapas topográficos y documentos. El proceso de delimitación requiere una interpretación visual de características en el mapa y por lo tanto es un poco subjetiva. Además, es necesaria la información auxiliar como localización de ríos, caminos y puentes para determinar los límites de la cuenca con precisión. De acuerdo a Turcotte *et al.* (2001), cuando la estructura de drenaje es utilizada en un contexto de simulación hidrológica, es importante determinarla con precisión, ya que el agua fluye diferente en un lago que en un río. Una manera de dirigir la limitación relacionada a errores en la localización de la red de drenaje es la técnica llamada "Stream burning". Esta técnica propone la utilización de información auxiliar con respecto al curso de agua, principalmente como arroyos digitalizados de mapas topográficos, con la finalidad de forzar al DEM a fluir a través de las celdas correspondientes a la red de arroyos.

Con base en lo anterior se refuerza el uso de información auxiliar relacionada a la localización de ríos y lagos como parte del método más viable para producir una mejor estructura de drenaje de una cuenca, aproximación que es utilizada en este estudio para determinar la dirección de flujo en zonas de bajo relieve.

Debe considerarse que la información digital de la posición y características de la red de drenaje y las cuencas es importante para el análisis de la presión e impactos en el recurso agua, ya que tales redes de drenaje y cuencas asociadas forman entidades

funcionales complejas de los procesos hidrológicos, por lo que son unidades naturales para propósitos de análisis o de manejo. Por la posible diversidad de fuentes, son las herramientas de SIG, similares a los aquí empleados, las que permiten el análisis combinado de datos digitales de elevación y parámetros ambientales con el fin de derivar este tipo de información (Vogt *et al.*, 2003).

### Cambios de Uso de Suelo y su Efecto en el Escurrimiento en la Sub-cuenca Río San Pedro

#### **Clasificación y Evaluación de la Exactitud**

La validación de la imagen del 2000, la fecha más reciente disponible, fue realizada utilizando un total de 192 puntos de control que fueron confirmados por verificación en campo (Tabla 8). De estos, 158 fueron posicionados en la diagonal mayor de la matriz de error, lo que representa un porcentaje de exactitud para la imagen de 82%. La exactitud es mayor al 80% considerado como umbral para ser aceptable, y si se incluyen las clases agua y poblados este parámetro se incrementaría a 85%, valor que es considerado estadísticamente aceptable (Anderson *et al.*, 1976), a pesar de que Rogan *et al.* (2003) mencionan que tal exactitud no existe para escenarios de detección de cambio, por lo que 80-85% parece ser un límite razonable, dependiendo de la complejidad del área de estudio. Utilizando los mismos datos de la matriz, se obtuvo un valor del coeficiente de Kappa de 0.79 (que podría incrementarse a 0.82) y que de acuerdo a la propuesta de Landis y Koch (1977), que clasifican los valores del coeficiente de Kappa en seis grupos como medidas de exactitud, corresponden a una concordancia de sustancial a casi perfecta entre la clasificación y los datos de referencia. Consecuentemente indica que la clasificación de la imagen resulta mejor que una obtenida al azar. No hubo datos disponibles para evaluar la exactitud de las clasificaciones de 1973 y 1990, pero debido a que el procesamiento fue el mismo que la imagen del 2000, se asumió un nivel de exactitud similar.

Individualmente, las clases con valores de exactitud del productor más elevados fueron manglar, marisma y selva, cada uno con 90% de exactitud, mientras que el suelo desnudo fue la clase que representó la exactitud más baja con un valor de 67%. Con respecto a la exactitud del usuario, el valor más elevado fue para suelos desnudos con 100%, mientras que la vegetación secundaria obtuvo el valor más bajo con 62%.

La evaluación de la exactitud es una característica importante al cartografiar la cobertura y uso del terreno, no sólo como una guía para representar la calidad y confiabilidad, sino también en el entendimiento de la incertidumbre temática y sus probables implicaciones para el usuario final (Czaplewski, 2003 en Treitz y Rogan, 2004). También es importante ya que permite conocer la magnitud del error que existe al generar o interpretar una clasificación, así como identificar y corregir las fuentes de error, ya que finalmente la información resultante del análisis de imágenes puede ser utilizada para algunos procesos de toma de decisiones y en programas de manejo de recursos naturales.

La razón por la que cada una de las clases presentó exactitudes de productor altas puede atribuirse a que estos tipos de cobertura son fácilmente distinguibles de imágenes Landsat con base en sus características espaciales y espectrales. También la extensión de cada una de las coberturas para cada fecha es apropiada para ser determinada con este tipo de imágenes (30 m tamaño del pixel) conduciendo a una clasificación satisfactoria.

**Tabla 8.** Exactitud global, coeficiente de Kappa y evaluación del error para la clasificación de la imagen Landsat ETM+ del 2000.

Datos Clasificados	Datos de referencia						Total Renglones	Exac. Usuario
	MN	MR	AGR	VS	SLV	SD		
Manglar (MN)	38	1			1		40	95
Marisma (MR)	4	33					22	82
Agrícola (AGR)			23	2		3	28	82
V secundaria (VS)		1	6	23	3	4	37	62
Selva (SLV)			1	5	36	3	45	80
S desnudo (SD)						20	20	100
Total columnas	42	20	30	30	40	30	192	
Exac. Productor	90	90	77	77	90	67		

Exactitud global = 82%; Kappa = 0.79

La agricultura dentro de la zona de estudio está compuesta de terrenos con baja densidad de siembra y de terrenos completamente expuestos, por lo que la clasificación de esta cobertura propició que se confundieran con vegetación secundaria y suelos desnudos. Considerando que la vegetación secundaria es toda aquella vegetación en estado de sucesión, la clasificación de esta cobertura generó confusión con las clases agrícola, selva y suelo desnudo, esto pudo ser ocasionado por la diferencia en la fecha de adquisición de las imágenes de satélite y las visitas a campo para validación, mismo que explicaría el valor de exactitud del productor de 77% para las clases agrícola y vegetación secundaria. Por otra parte, los errores de clasificación para el suelo desnudo están asociados principalmente con las características de la zona, en la que puede predominar la selva baja o pastizales inducidos, que en épocas de secas quedan como terrenos completamente expuestos.

En términos generales es posible señalar que parte de los errores asociados con la exactitud de usuario pueden ser directamente atribuidos al registro de los datos y el nivel de precisión del GPS. Algunos de los puntos de control que no correspondieron con la clasificación, podrían ser aceptables cambiando la localización de algunas de las observaciones de campo por unos pocos metros, lo que podría mejorar la exactitud de la clasificación. Sin embargo, esto no se hizo debido a que no se conoce la fuente actual de error, que como ya se señala arriba, puede ser debido al desfase entre la colecta de los datos de campo con el GPS, particularmente cuando tiene que ver con actividades asociadas a la agricultura cuyas coberturas pueden variar en términos de respuesta espectral, conforme varía el ciclo agrícola. Asimismo, el error puede asociarse con las correcciones efectuadas sobre las imágenes, incluyendo los procesos de corrección geométrica y geográfica para lograr el registro de las imágenes. Este tipo de errores ha sido reportado por Ruiz-Luna y Berlanga-Robles (2003) al determinar los cambios en la cobertura y uso del terreno enfatizando las alteraciones de las lagunas costeras como consecuencia del crecimiento urbano en el noroeste de México. De acuerdo a Alonso-Pérez *et al.*, 2003, otros errores son los asociados al parecido espectral de las clases, y

errores a consecuencia de una mala clasificación especialmente en píxeles localizados al borde de dos o más clases.

Después de la validación de la clasificación, se estimó el área cubierta por cada clase a través del tiempo y se determinaron las tendencias de cambio entre fechas en términos de la variación de superficie (Tabla 9). La suma de las ocho coberturas varió de 289,627 a 289,708 ha (menos de 0.05%) en las tres escenas, principalmente debido al proceso de rectificación geométrica para igualar el tamaño del píxel en todas las escenas. El área de estudio se caracterizó principalmente por la presencia de selva, que representa aproximadamente 66% (190,812 ha) del área total, distribuyéndose principalmente en la parte centro y norte del área de estudio, que corresponde a una zona de topografía elevada en la región oriental del área de estudio (Fig. 11). Es importante mencionar que algunos parches clasificados como selva en la parte sur podrían corresponder a otro tipo de vegetación e inclusive a agricultura, ya que a pesar de que presenta una exactitud de productor alta (90%), también presenta una exactitud de usuario moderada (80%).

La segunda cobertura con mayor extensión fue la clase agrícola con un 11% (31,710 ha). El área ocupada por este uso del terreno es compartida con la vegetación secundaria, misma que representa un 8% (22,089 ha) del área de estudio. Las clases restantes cubrieron menos de un 16% del área total; siendo la parte sur de la cuenca, en áreas cercanas a la costa, dominada por manglar y zonas de marismas.

**Tabla 9.** Superficie en hectáreas y tendencias de cambio de las coberturas y uso del terreno de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México.

Clase	Área (Ha)			Variación (Ha)		
	1973	1990	2000	1973-1990	1990-2000	1973-2000
Agua	9816	4075	5637	-5741	1562	-4179
Manglar	10741	9681	11198	-1059	1517	458
Marisma	4057	8182	6128	4124	-2053	2071
Agrícola	28089	39021	31710	10932	-7311	3621
V secundaria	10424	14445	22089	4021	7644	11665
Selva	187765	128576	190812	-59188	62236	3048
S desnudo	37839	84294	20490	46455	-63804	-17349
Poblados	977	1342	1563	364	222	586

Partiendo de los resultados de la clasificación de 1973, el cambio más drástico observado con respecto a la clasificación de 1990 fue la disminución de la selva, de aproximadamente 60,000 ha, equivalente a casi un 32% de su extensión. Más de 84,000 ha de suelo desnudo aparecen para 1990, lo cual significa un incremento de aproximadamente el doble de su extensión en 1973. Esto no debe interpretarse necesariamente como una pérdida excesiva de la cobertura vegetal, ya que se observa una recuperación de esta cobertura para el 2000, y como se mencionó anteriormente, la selva baja y pastizales naturales e inducidos pueden quedar completamente expuestos en época de secas, particularmente en periodos de extrema sequía. Aunque este error trató de minimizarse al utilizar escenas de fechas aproximadas, las escenas de 1973 y 1990 corresponden al periodo de secas mientras que la del 2000 corresponde a finales del periodo de lluvias, las variaciones interanuales en precipitación pudieron generar diferencias fenológicas en la cubierta vegetal, por lo que esto pudiera generar una aparente pérdida de cobertura, explicando la drástica disminución de esta cobertura y su posterior recuperación.

Por lo que corresponde a agricultura, se observa un aumento de casi 11,000 ha de la clase agrícola, siendo la cobertura que obtiene el mayor crecimiento después del observado en suelos desnudos. Por otra parte, el área cubierta por la clase poblados ocupaba para 1973 aproximadamente 1,000 ha, representando así 0.3% del área estudiada, incrementándose a cerca del 0.5% para 1990, con un aumento de cerca de 350 ha. Es importante señalar que la técnica utilizada para la estimación de esta última cobertura, está basada en la digitalización sobre pantalla y apoyada en cartografía (escala 1:50,000), por lo que, particularmente para 1973 pudiera darse sub o sobre-evaluación de su extensión, considerando el tamaño de pixel (60 m). Desafortunadamente no hay datos de INEGI para contrastar lo reportado en este estudio ya que esta dependencia sólo reporta total de población y no extensión de la cobertura poblados.

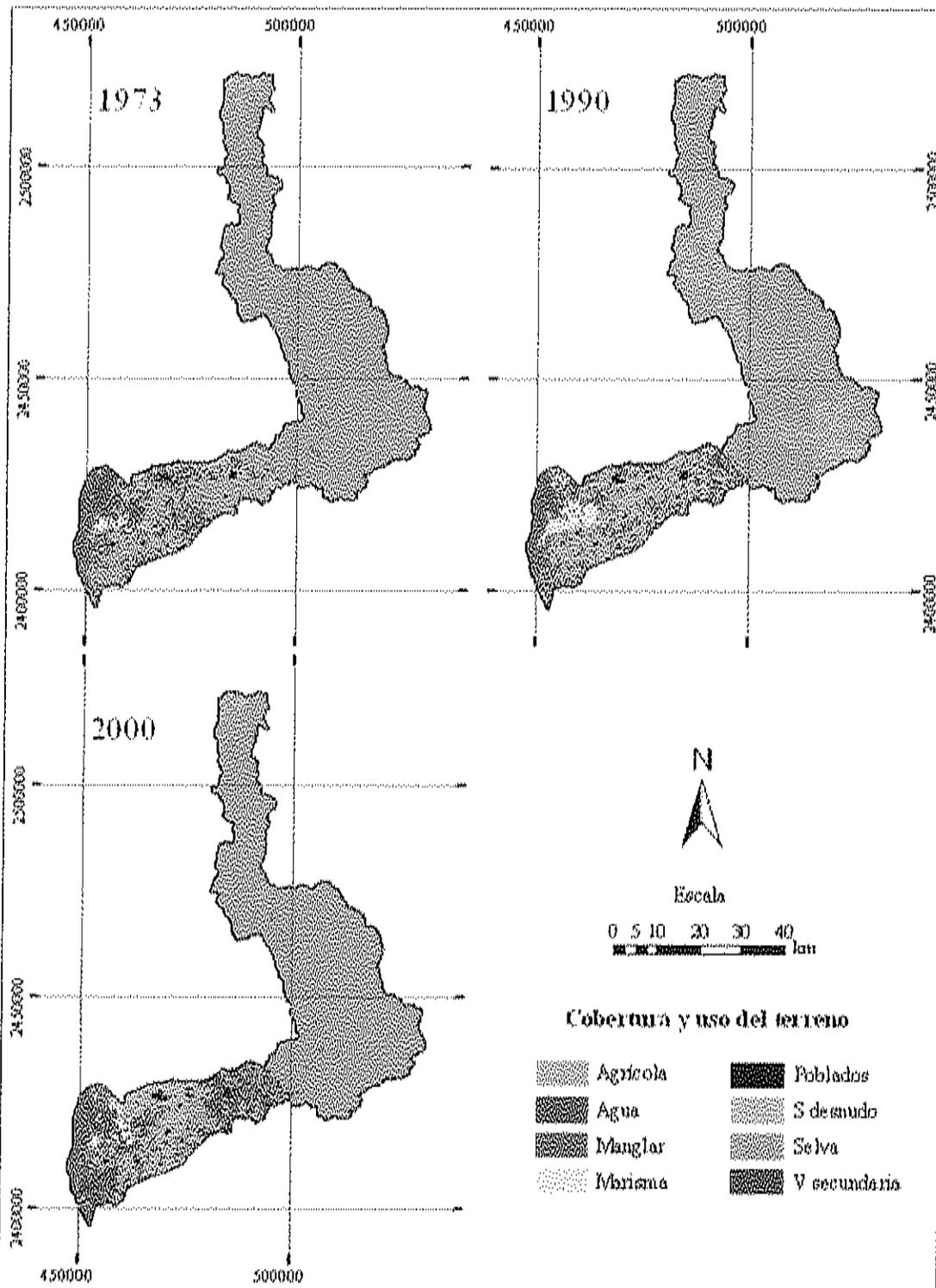


Fig. 11. Cobertura y usos del terreno de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México, a partir de clasificación de imágenes Landsat (1973-2000).

En contraste, para el periodo de 1990-2000, el cambio más relevante fue un aumento de aproximadamente 62,000 ha de la clase selva y una disminución considerable de suelo desnudo de casi 64,000 ha, por lo que se confirma la posibilidad de que las variaciones observadas en el periodo anterior, hayan sido consecuencia de variaciones fenológicas, más que por pérdida o ganancia de cobertura. Helmschrot y Flügel (2002), mencionan que esto puede ser explicado debido a las características fenológicas del pastizal que en época de lluvias muestra una reflexión más intensiva en los canales del infrarrojo cercano, y que podría ser separado satisfactoriamente o confundido con facilidad con otra cobertura vegetal. Por su parte, Yuan y Elvidge (1998) mencionan que estas diferencias fenológicas u otras diferencias que causan cambios espectrales dentro de una clase pueden ser la causa de errores de comisión al momento de la detección de cambio. Como menciona Prenzel (2004), incluso en fechas próximas, las disparidades fenológicas debido a la precipitación local y las variaciones en la temperatura pueden presentar problemas. Por lo tanto, para minimizar diferencias estacionales y fenológicas es necesario que las imágenes sean adquiridas en las mismas fechas.

Por lo que toca a la clase agrícola, para este periodo se observó un cambio negativo, con pérdida poco más de 7,000 ha, mientras que la vegetación secundaria creció en proporción similar, lo que nuevamente conduce a la problemática que se deriva de los cambios temporales en suelos asociados con actividades agrícolas, ya que en función del tipo de cultivo y temporada, los suelos agrícolas pueden presentarse en estado de barbecho o en diferentes etapas de crecimiento del cultivo. Por otro lado si estos terrenos quedan abandonados por largo tiempo pueden llegar a iniciarse procesos de colonización (sucesión secundaria) u observarse como suelos desnudos. Finalmente hay una recuperación de 1500 ha de manglar en el periodo de 1990 al 2000 y también se presenta un incremento de dimensiones similares para la clase agua. Esto probablemente sea consecuencia de la diferencia entre temporadas de la toma de las imágenes. La escena de 1990 es de temporada de secas con una sobrevaloración en coberturas como suelos desnudos, quizá se subestimó la extensión del manglar porque del periodo 1973-1990 sí hay pérdidas.

En términos generales, la estructura del paisaje en términos de la extensión de las coberturas, no presenta diferencias importantes, el mayor cambio observado durante el periodo de estudio (1973-2000) se dio con la disminución de la clase suelo desnudo de más de 17,000 ha, y la clase agua por 4,200 ha.

De acuerdo a Alonso-Pérez *et al.* (2003), la deforestación y la sedimentación natural y antropogénica de estuarios y lagunas, y otros cambios en la hidrología han sido las mayores causas de pérdidas y modificaciones en los sistemas de manglar, modificando consecuentemente la diversidad y la producción de las comunidades de estos sistemas. Sin embargo, entre las coberturas naturales, la clase manglar permaneció casi sin cambio, mostrando un pequeño aumento de apenas 500 ha en un periodo de 27 años, mientras que la selva mostró un aumento de 3,000 ha. Aunque se observa una tendencia de incremento de la clase vegetación secundaria, su aumento fue de sólo 11,700 ha. Con respecto a la cobertura agrícola, ésta presentó un aumento de 3600 ha. Bajo estas consideraciones, el crecimiento de la agricultura y de la vegetación secundaria, resultado de deforestación son los principales modificadores del paisaje, tal como ha sido el caso en otras regiones del noroeste del país (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, 1999; Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002; Alonso-Pérez *et al.*, 2003). Estas tendencias de cambio de coberturas naturales hacia zonas agrícolas y de asentamientos humanos se presenta frecuentemente como resultado del desarrollo económico regional (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, 2003).

En el presente estudio el paisaje se encuentra caracterizado principalmente por la presencia de la clase selva para las tres fechas de estudio, que a diferencia de otras regiones del noroeste de México donde las coberturas agrícolas o el desarrollo urbano caracterizan al paisaje (Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002, Alonso-Pérez *et al.*, 2003) (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, 2003), e inclusive donde las áreas destinadas a la agricultura han sido desplazadas para su transformación a usos urbanos.

### **Detección de Cambio**

Considerando que el análisis de exactitud para la clasificación de la imagen más reciente indica una alta concordancia con los datos obtenidos en campo y asumiendo que las clasificaciones posteriores fueron razonablemente precisas, se generaron las matrices de detección de cambio de 1973 a 1990, de 1990 a 2000 y de 1973 a 2000 para evaluar los cambios resultantes de las conversiones de uso del terreno.

Dado que el área de estudio está incluida en dos imágenes, se asumió que el método post-clasificador era el más adecuado ya que involucra la clasificación de las imágenes para cada fecha de manera independiente por lo que los mapas temáticos resultantes fueron entonces comparados y analizados para cartografiar el tipo de cambio (Singh, 1989; Yuan y Elvidge, 1998).

Los resultados derivados del análisis de detección de cambio por clase se indican en la Tabla 10 y de manera similar al análisis de exactitud, los píxeles de concordancia entre ambas fechas, para los que se asume que no hubo cambio están localizados a lo largo de la diagonal mayor de la matriz (Congalton y Green, 1999). En términos generales, los principales cambios se dieron durante el período 1973-1990, aunque gran parte de los cambios observados parecen consecuencia de las condiciones durante los cuales se registró la imagen de 1990, ya que para el período completo (1973-2000), el valor de Kappa implica que hubo menos del 20% de cambios en área de estudio.

Comparando el total de hectáreas entre fechas para cada una de las coberturas se nota que existen diferencias entre datos. Esto puede atribuirse a que algunos píxeles generalmente en el borde de las imágenes que correspondieron con la parte de fondo y fueron considerados como cambio cuando en realidad no eran, pero por ser mínima esta cantidad (46 ha en promedio con un máximo de 240 ha para la selva en el año 2000) fueron excluidos del análisis. Un error similar fue reportado por Yuan *et al.* (2005), y lo atribuyen a errores en el registro de las imágenes y al afecto de borde que causa errores aparentes en la determinación de cambio y no-cambio.

La Tabla 10 muestra que para el periodo de 1973 a 1990 los cambios más importantes están asociados con la reducción de la clase selva. De las 187,470 ha calculadas en 1973, sólo el 62% (115,400 ha) permaneció sin cambio, mientras que un 6% (12,120 ha) fue localizado en áreas previamente clasificadas como suelo desnudo. Esta última cobertura aumentó más del doble de su extensión (de 37,770 ha a 84,180 ha), de las que 21,690 ha permanecieron en la misma zona y 58,930 ha fueron subsidiadas por la selva. Por su parte, la clase agua, una de las coberturas más dinámicas, disminuyó su extensión por 5,700 ha. De las 9,780 ha estimadas para 1973, sólo un 26 % (2,500 ha) permaneció sin cambio y las mayores conversiones se hicieron hacia marisma (2,400 ha), agricultura (1,530 ha) y manglar (1,240 ha).

En contraste, otra de las clases con alta dinámica fue la vegetación secundaria con un aumento de 4,010 ha. Su crecimiento se dio principalmente con el desplazamiento de la selva (5,120 ha), agricultura (4,590 ha) y suelo desnudo (1,500 ha), mientras que sólo 1,610 ha permanecieron sin cambio. La marisma mostró un incremento casi de igual magnitud (4,120 ha) que la vegetación secundaria. De las 8,170 ha estimadas para 1990, 2,400 pertenecen a áreas clasificadas previamente como agua, 1,720 ha pertenecían a manglar y sólo 2,820 se encontraban en la misma zona en ambas clasificaciones.

Siguiendo con la Tabla 9, durante el periodo 1990-2000 nuevamente el cambio más relevante se da sobre la cobertura selva pero en esta ocasión manifestándose con un incremento de 62,230 ha. Sólo 119,200 ha permanecieron sin cambio durante este periodo mientras que 64,130 ha de suelo desnudo fueron desplazadas por esta cobertura. Al igual que la selva, la vegetación secundaria presenta un incremento en su extensión, desplazando principalmente a la agricultura (8,980 ha), suelo desnudo (7,280 ha) y a la marisma (1,500 ha), y similar al periodo anterior, sólo una pequeña porción (3,430 ha) permaneció sin cambio en ambas fechas. Por su parte, la agricultura muestra una disminución de 7,310 ha, que como se mencionó anteriormente se encuentra subsidiando principalmente a la vegetación secundaria (8,980 ha). La suma de estas dos coberturas para 1990 fue de 53,500 ha y permanece similar para el 2000 con 53,800 ha. Esto podría

indicar que la capacidad agrícola llegó a su límite natural antes de 1990, y no es factible mayor expansión por desplazamiento de la cobertura selva ya que esta última cobertura se encuentra distribuida principalmente en zonas accidentadas de la sub-cuenca.

Para todo el periodo de estudio, la vegetación natural fue la cobertura de mayor extensión en todas las fechas, pero también es la más rápidamente transformada, especialmente para uso agrícola. La cobertura natural (agua, manglar, selva y suelo desnudo) representó cerca del 85% del total en 1973 y disminuyó a cerca del 78% de las áreas clasificadas en 1990 y 2000. Tal disminución podría tener efectos en la disponibilidad de hábitat para especies silvestres, considerando que las superficies acuáticas tuvieron una reducción de 43%, mientras que el manglar mantuvo su extensión sin cambio notable durante el periodo de estudio. Por lo tanto, es importante la caracterización de los tipos de cobertura, su extensión, y distribución sobre el tiempo para monitorear la condición del ecosistema y para el estudio de varios procesos incluyendo la disponibilidad de hábitat, función de los humedales, localización de fuentes no puntuales de contaminación, y el estudio de los potenciales de erosión y sedimentación.

En ese sentido cabe mencionarse que el manglar, una clase importante debido a las funciones y servicios ecológicos y económicos que ofrece a los ecosistemas costeros, representó menos del 4% del área estudiada, aunque el manglar localizado en la región se encuentra dentro del sistema Marismas Nacionales, uno de los más extensos del Pacífico oriental y para el cual se han detectado grandes cambios en su extensión, así como elevadas tasas de mortalidad por causas naturales y por la apertura del canal de Cuautla, al norte de la zona de estudio (Kovacs *et al.*, 2001; Acosta-Velázquez, 2003). Desde la apertura del canal en 1972 el sistema ha experimentado degradación considerable. Kovacs *et al.* (2001), en un estudio utilizando imágenes Landsat reportó que para 1999 aproximadamente 10% y 23% de los manglares del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava estaban muertos y en pobres condiciones, respectivamente. Acosta-Velázquez (2003) reporta para todo el sistema Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales una pérdida de 3,355 ha manglar hacia agua, que se pueden asociar a los

impactos reportados por la apertura del canal de Cuautla en la década de los 70 y a los efectos del Huracán Rosa en 1994. Por su parte, Ruiz-Luna *et al.* (2005), mencionan que para el manglar la pérdida se ha asociado principalmente con la apertura del canal de Cuautla y el cambio de condiciones en los patrones hidrológicos de la región, reduciendo el aporte de agua dulce a los sistemas estuarinos, lo que ha traído como consecuencia una marinización de estos sistemas y la consecuente muerte de mangle adaptado a otras condiciones de salinidad.

Ruiz-Luna *et al.* (sometido) menciona que aunque en términos generales la cobertura de manglar se ha venido deteriorando por efecto de la deforestación inducida, a consecuencia de cambios drásticos en el régimen hidrológico (apertura del canal de Cuautla en Nayarit) o por efectos naturales (huracanes y tormentas), no existen evidencias de una deforestación acelerada para la región del noroeste. Para este estudio, en esta clase se detectó un ligero incremento de extensión entre 1973 y 2000, situación que también se ha observado en algunos sistemas costeros de Sinaloa, para los que se ha documentado un incremento (Monzalvo-Santos, 2006), pese a que existen referencias que señalan la pérdida de cobertura de manglar de manera importante a nivel nacional (Ruiz-Luna *et al.*, (sometido).

De las 11,190 ha de manglar calculadas para el año 2000, 7,830 ha (70%) fueron localizadas en la misma área en la escena de 1973, lo que equivale a una elevada estabilidad de residencia, si bien es una cobertura con una gran dinámica ya que 1,700 ha (15%) fueron localizadas en áreas previamente clasificadas como agua y 850 ha (7.6%) estaban ocupadas por marismas.

**Tabla 10.** Matrices de detección de cambio de las cobertura del terreno (ha) de la sub-cuenca Río San Pedro, Nay., México y evaluación del coeficiente de Kappa para los periodos 1973-1990, 1990-2000 y 1973-2000. Nota: AC (Agua), MN (Manglar), MR (Marisma), AGR (Agrícola), VS (Vegetación secundaria), SLV (Selva), SD (Suelo desnudo), POB (Poblados).

	Clase	1973								Total	Total
		AC	MN	MR	AGR	VS	SLV	SD	POB	(ha)	(%)
1990	AC	2497	785	106	287	68	217	108	6	4074	1.4
	MN	1243	7383	491	75	350	122	8	0	9671	3.3
	MR	2401	1717	2817	447	690	97	3	0	8172	2.8
	AGR	1530	200	362	19747	7250	7515	2296	85	38985	13.5
	VS	940	474	192	4590	1609	5115	1453	48	14421	5.0
	SLV	373	27	8	378	81	115399	12119	13	128397	44.4
	SD	768	129	81	2267	290	58927	21692	24	84178	29.1
	POB	30	0	0	270	72	80	87	802	1341	0.5
	Total (ha)	9781	10714	4056	28061	10410	187473	37767	977	289239	
Total (%)	3.4	3.7	1.4	9.7	3.6	64.8	13.1	0.3			

Kappa = 0.75

	Clase	1990								Total	Total
		AC	MN	MR	AGR	VS	SLV	SD	POB	(ha)	(%)
2000	AC	2962	414	721	491	391	365	292	1	5638	1.9
	MN	715	8464	1417	121	397	29	58	0	11200	3.9
	MR	63	359	4420	613	629	24	21	0	6128	2.1
	AGR	64	12	99	26258	4339	98	803	38	31711	10.9
	VS	132	396	1502	8977	3429	311	7282	59	22089	7.6
	SLV	96	30	23	2109	5170	119202	64133	33	190794	65.9
	SD	38	1	0	209	36	8538	11659	1	20483	7.1
	POB	3	0	0	245	55	1	50	1209	1563	0.5
	Total (ha)	4072	9676	8182	39023	14445	128569	84297	1342	289606	
Total (%)	1.4	3.3	2.8	13.5	5.0	44.4	29.1	0.5			

Kappa = 0.77

	Clase	1973								Total	Total
		AC	MN	MR	AGR	VS	SLV	SD	POB	(ha)	(%)
2000	AC	2951	761	211	651	154	579	320	9	5635	1.9
	MN	1702	7828	847	188	516	102	4	0	11187	3.9
	MR	1677	1158	1958	601	628	91	6	0	6119	2.1
	AGR	1272	72	131	17734	7121	4744	529	73	31676	11.0
	VS	1207	838	872	6473	1543	6855	4204	71	22063	7.6
	SLV	806	51	37	1949	310	164069	23278	55	190554	65.9
	SD	128	0	1	63	9	10924	9312	1	20438	7.1
	POB	34	0	0	403	131	108	118	769	1563	0.5
	Total (ha)	9777	10708	4056	28062	10411	187473	37771	977	289235	
Total (%)	3.4	3.7	1.4	9.7	3.6	64.8	13.1	0.3			

Kappa = 0.82

Dentro de las clasificaciones, el manglar y la selva muestran características espectrales similares, así como las marismas y la agricultura, por lo que no fue posible separar cada una de las coberturas clasificando a la sub-cuenca como un todo, aún utilizando algoritmos de clasificación no supervisada, fue necesaria la utilización de máscaras para crear sub-escenas y hacer clasificaciones por separado. Otra propuesta es emplear el algoritmo de extracción y clasificación de objetos homogéneos (ECHO), que no sólo considera las variaciones espectrales de la imagen sino que también toma en cuenta las variaciones espaciales de los píxeles que forman dicha imagen, método que ya ha sido utilizado para detectar modificaciones en los patrones de cobertura y uso del terreno en la zona costera del Noroeste de México (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, 1999; Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002).

Con respecto a la clase agua, una de las coberturas que creó menor confusión y motivo por el cual no fue incluida en la evaluación de la exactitud, mostró una disminución de casi el 43% (4,140 ha) de su cobertura. De las 9,780 ha que conformaban esta clase en 1973, sólo el 30% (2,950 ha) permanecieron sin cambio. Un 17% (1,700 ha) del área clasificada como agua en 1973 fue desplazada por manglar, un porcentaje semejante por marisma (1,680 ha), y un 12% (1,210 ha) y 13% (1,380 ha) es clasificado como vegetación secundaria y clase agrícola respectivamente en la escena del 2000 (Fig. 12). Aunque la reducción de esta cobertura puede variar de un año a otro debido a variaciones en la precipitación y temperatura, esta evidente reducción de la clase agua probablemente puede ser asociada con variaciones naturales de las entradas de agua, un proceso común en sistemas acuáticos costeros.

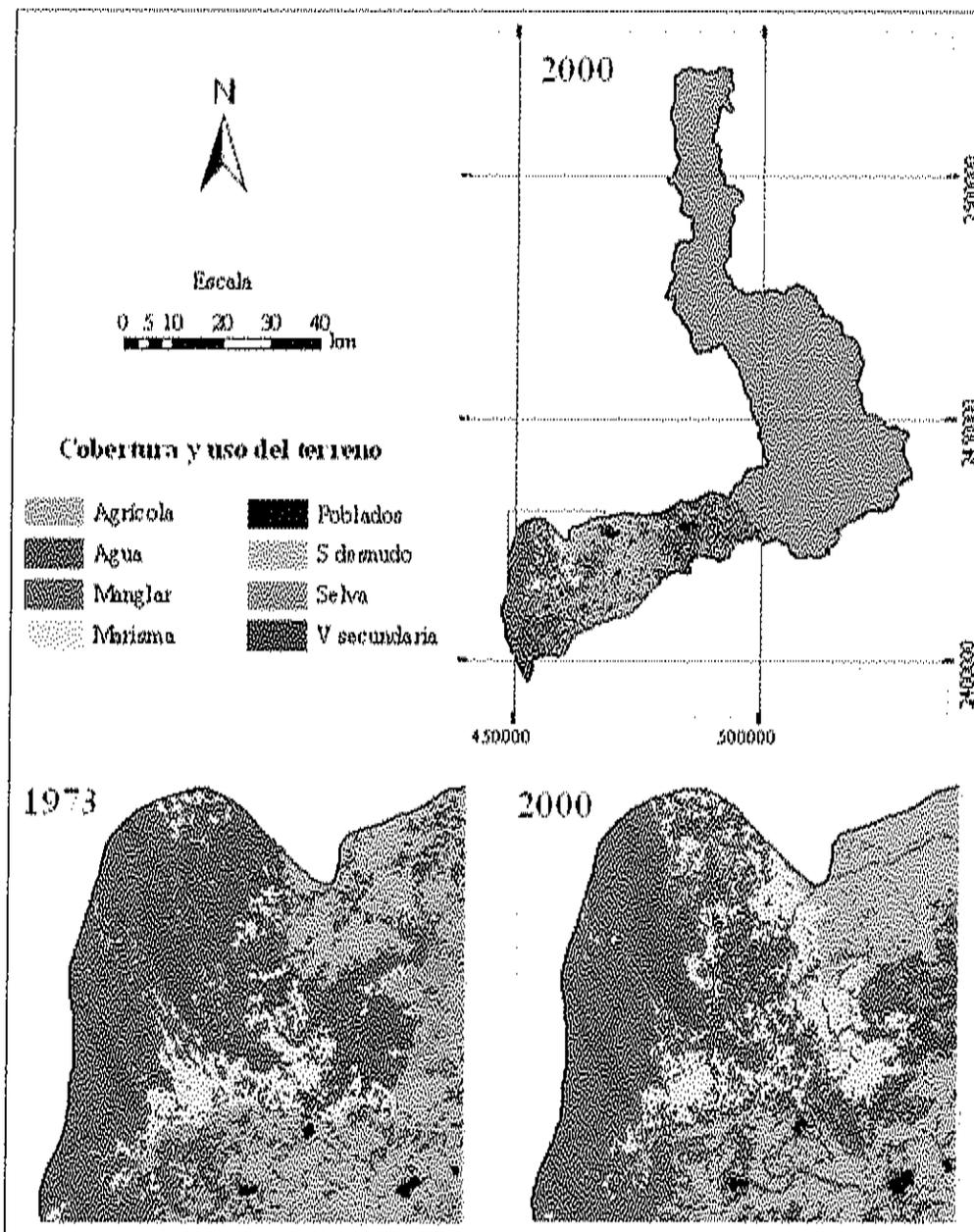


Fig. 12. Zonas de mayor pérdida de los cuerpos acuáticos (1973-2000) en la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México.

Acosta-Velázquez (2003), señala pérdida de manglar por conversión a cuerpos de agua en todo el sistema lagunar Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales a consecuencia de la abertura del Canal de Cuautla en 1972. En la Fig. 12 se puede observar la zona de recuperación de manglar, situación similar reportada por Monzalvo-Santos (2006) para

algunos sistemas costeros de Sinaloa. Debido a que en esta zona de lagunas drena el Río San Pedro, se podría estar ocasionando el asolvamiento a consecuencia de los efectos acumulativos de la sub-cuenca del mismo nombre, propiciando estos cambios en la cobertura y uso del terreno. De esta manera, la acreción de tierra por sedimentación en la boca podría estar contribuyendo a la regeneración natural del manglar.

Por lo que corresponde a las coberturas inducidas, la Tabla 10 muestra que el aumento de la clase agrícola por 11.3% (3,580 ha) fue producido principalmente sobre la selva (4,740 ha) y también subsidiado por vegetación secundaria (7,120 ha), que primordialmente se deriva de procesos agropecuarios, tales como el desmonte para ganar terreno para potreros y áreas de cultivo. Esta última clase incrementó su cobertura poco más del doble para el año 2000 (22,060 ha), de la que el 31% (6,860 ha) se produjo sobre la selva y el 29% (6,470 ha) sobre la clase agrícola. De acuerdo a estos resultados, la vegetación nativa y la agricultura mostraron una tendencia de incremento. La cobertura agrícola mostró un aumento para 1990 y se comportó de manera inversa para el 2000, contrario a la vegetación secundaria que siempre estuvo en aumento.

A pesar de que el Anuario estadístico de la producción agrícola (SAGARPA, 2005) cuenta con información valiosa del total de hectáreas cultivadas y cosechadas ya sea por municipio o por distrito de riego (DDR), estos datos no pueden ser directamente comparables ya que el área de estudio no sigue estos límites políticos, además de que sólo ocupa una pequeña porción de los municipios que componen el DDR Santiago Ixcuintla (Rosamorada, Ruiz, Santiago Ixcuintla, y Tuxpan). Por otra parte, la serie de datos corresponde al periodo 2001-2005 (después del periodo de estudio), y si bien las mayores superficies de agricultura siniestrada se presentaron en el municipio de Santiago Ixcuintla, estos no siguen una tendencia definida ya que para el año agrícola en este municipio, en el 2001 sólo hubo 332 ha siniestradas, mostrándose un aumento considerable en el 2003 con 5,941 ha, y disminuyendo a 2,764 ha para el 2005. Este tipo de tendencia se observó también para el Distrito de Riego.

Los cambios observados de disminución de la clase agrícola y aumento de la vegetación secundaria, pueden atribuirse a que los campos agrícolas son temporalmente

abandonados y los procesos sucesionales toman lugar, estableciéndose la vegetación secundaria. Berlanga-Robles (2006) menciona que el aumento de la extensión agrícola, en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, más que un crecimiento de la frontera agrícola se debe interpretar como una recuperación de terrenos para la actividad y que su crecimiento sólo sería factible por la recuperación de terrenos o a expensas de otras coberturas antropogénicas. A pesar de que la agricultura en la cuenca Lechuguilla es predominantemente tecnificada y en el municipio de Santiago es principalmente de temporal, esto es aplicable para el presente estudio, aunque también podría deberse a agricultura siniestrada con procesos de sucesión.

Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con los de Berlanga-Robles (2006) y muestran una degradación del ambiente natural (lagunas, manglar, selva y suelo desnudo) en la sub-cuenca Río San Pedro ya que los cuerpos acuáticos muestran una disminución de 4,140 ha, y de las 5,640 ha presentes en el 2000, sólo el 52% (2,950 ha) permanecen en la misma zona para 1973. La marisma aumenta 51% (2,060 ha) de su cobertura original pero sólo el 32% (1,960 ha) de la cobertura del 2000 permanece sin cambio. A pesar de que se muestra un aumento de las clases manglar y selva, este fue de sólo el 4% (480 ha) y 2% (3,080 ha) (respectivamente) de su cobertura original, mientras que el 70% (7,830 ha) y 86% (164,070 ha) de estas coberturas se encontraban en la misma zona en 1973. Ruiz-Luna *et al.* (sometido) menciona que el cambio de usos del suelo está teniendo un efecto sobre los manglares, modificando además de la extensión, la calidad de esta cobertura vegetal, empobreciéndola, ya sea por disminución de la densidad o bien por el rejuvenecimiento de los bosques debido a procesos naturales o de recolonización del manglar, que no garantiza necesariamente los servicios y beneficios que los manglares maduros otorgan de forma natural. Por lo tanto, es importante conservar estas áreas de manglar y selva que han permanecido en la misma zona desde inicio del periodo de estudio.

Finalmente, del área cubierta por selva en el 2000, el 86% (164,070 ha) fueron localizadas en la misma área en la escena de 1973, y el mayor incremento (23,280 ha) se dio principalmente sobre el suelo desnudo. Así mismo, no hay un incremento

considerable de la clase poblados desde 1973, por lo que la mayoría de las transformaciones están relacionadas a cambios en el uso del terreno, transformando especialmente áreas naturales a agricultura. De acuerdo a Alonso-Pérez *et al.* (2003), la conversión de selva a terrenos agrícolas resulta en un incremento en el escurrimiento y pérdida en la recarga de los mantos freáticos.

En general, algunos de los cambios observados podrían ser explicados por la ocurrencia de procesos naturales, pero especialmente fueron generadas por prácticas inducidas por el hombre, tales como la deforestación y cambios en el uso del terreno. Considerando que los niveles de exactitud son suficientes para discriminar límites entre clases con cierta precisión, suficiente para caracterizar el paisaje en el área de estudio y determinar tendencias de cambio seguidas por las principales coberturas y uso del terreno, especialmente si los cambios son evaluados a escala de cuencas.

Con respecto a los procesos de clasificación y la estimación de las tendencias de cambio, es importante señalar que se observaron patrones de cambio que resultan evidentes como es el paso de selva a zonas agrícolas o vegetación secundaria, y de manglar a marismas. En todos los casos esta conversión es posible, aunque también estuvieron presentes situaciones de cambio inusuales y poco comprensibles y que probablemente son producto del error de la clasificación. Por ejemplo, entre 1973 y 2000, 34 hectáreas de poblados se encuentran en áreas donde anteriormente fue clasificado como agua. Estos cambios pueden ser asociados con errores de omisión y comisión en los mapas de cambio de las clasificaciones Landsat.

Otra fuente de cambio puede atribuirse a la resolución de las imágenes y a la corrección geométrica aplicada para ajustar los parámetros espaciales de las imágenes a comparar manifestándose en aumentos o reducciones en el área de cada una de las coberturas. Por ejemplo, la clase manglar tuvo una extensión de 11,230 ha en la imagen con resolución de 30 metros y se redujo a 11,198 ha cuando se ajustó el pixel a una resolución de 60 metros. Los errores en el registro de las imágenes pueden causar errores aparentes en la determinación de cambio contra no-cambio.

Varios investigadores han realizado estudios para monitorear los cambios en la cobertura y uso del terreno en una amplia variedad de ambientes (Singh, 1989; Yuan y Elvidge, 1998; Kovacs *et al.*, 2001; Prenzel y Treitz, 2004; Yuan *et al.*, 2005). En el presente estudio como en otros similares dentro de la región noroeste del país (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, 1999; Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002; Alonso-Pérez *et al.*, 2003), el uso de análisis multitemporal post-clasificadorio ha resultado una técnica adecuada y útil para estudios de detección de cambio. Este método reduce la fuente de error sólo al proceso de rectificación geométrica puesto que las imágenes para cada fecha se clasifican por separado.

En resumen, y de acuerdo con Yuan *et al.* (2005), la información derivada de imágenes de percepción remota pueden jugar un papel importante para cuantificar y entender la naturaleza de los cambios en la cobertura del terreno y dónde ocurren estos cambios. Una vez que se ha obtenido la clasificación, se puede derivar información adicional. Por ejemplo, Acosta-Velázquez (2003) derivó métricas del paisaje de las clasificaciones para investigar los cambios en la fragmentación del paisaje del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales; y Berlanga-Robles (2006) las utilizó como parámetros de entrada en el método del número de curva del NRCS para determinar los cambios en los patrones de escurrimiento en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste en el noroeste de México como consecuencia de cambios en la cobertura y uso del terreno.

### **Tipo de Suelos**

Basados en la información de tipo de suelo que es proporcionada por INEGI y en la cobertura del terreno obtenida por medio de la clasificación, los números de curva fueron estimados utilizando el National Engineering Handbook (NEH 4) del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (USDA, 1986).

De las siete unidades de suelo presentes en la sub-cuenca, el Regosol fue el suelo dominante, ocupando el 29% (84,600 ha) del área total. Este tipo de suelos tiene poco

desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí (INEGI, 2005). En orden de importancia y de acuerdo a la clasificación de la **FAO, ISRIC e ISSS (1998)**, el suelo tipo Regosol fue seguido de los Cambisoles, que representan el 23% del área y Fluvisoles con 19%, que en conjunto suman más del 70% de los suelos (Tabla 11). El Cambisol corresponde a suelos muy delgados que están colocados directamente encima de un tepetate, mientras que los Fluvisoles están desarrollados sobre depósitos aluviales. Dentro de los tipos de suelo, el Luvisol fue el tipo de suelo con menor extensión (1,580 ha) cuya vegetación es generalmente Selva o Bosque y se caracteriza por tener un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo.

**Tabla 11.** Tipos de suelo (FAO, ISRIC e ISSS, 1998) presentes en la sub-cuenca Río San Pedro.

Tipo de Suelo	HSG	Área (ha)	%
Cambisol	C	66704	23.0
Feozem	B	28085	9.7
Fluvisol	A	55981	19.3
Leptosol	D	37050	12.8
Luvisol	D	1577	0.5
Regosol	C	84599	29.2
Solonchak	D	15662	5.4

Por lo que toca a los Grupos Hidrológicos del Suelo (HSG) correspondientes, su distribución en la sub-cuenca Río San Pedro queda expresada en el mapa temático de la Fig. 13. Los grupos hidrológicos C y A (52.2% y 19.3% del área total respectivamente) son los que ocupan la mayor extensión en la sub-cuenca, y de acuerdo a la clasificación hidrológica del NRCS (USDA, 1986), los suelos del grupo hidrológico A se caracterizan por tener un bajo potencial de escurrimiento y una alta tasa de infiltración, mientras que los pertenecientes al grupo C tienen de moderado a alto potencial de escurrimiento. Un porcentaje similar (18.7%) de la cuenca tiene un alto potencial de escurrimiento y es representado por el grupo hidrológico D. Dado que algunos suelos del grupo D tienen una capa permanente de agua, presentan problemas de drenaje. Una vez que estos suelos son efectivamente drenados, son ubicados en diferente grupo hidrológico (USDA, 1986). En la sub-cuenca no se presentó tal condición, ya que los suelos que componen a este

grupo son los Leptosoles que se caracterizan por ser poco profundos y limitados por la presencia de roca o tepetate, por Luvisoles cuya vegetación generalmente es selva, y por Solonchaks, que tienen alto contenido de sales en todo o alguna parte del suelo, y que a pesar de presentar una capa permanente de agua, no cambian en ningún momento de grupo hidrológico.

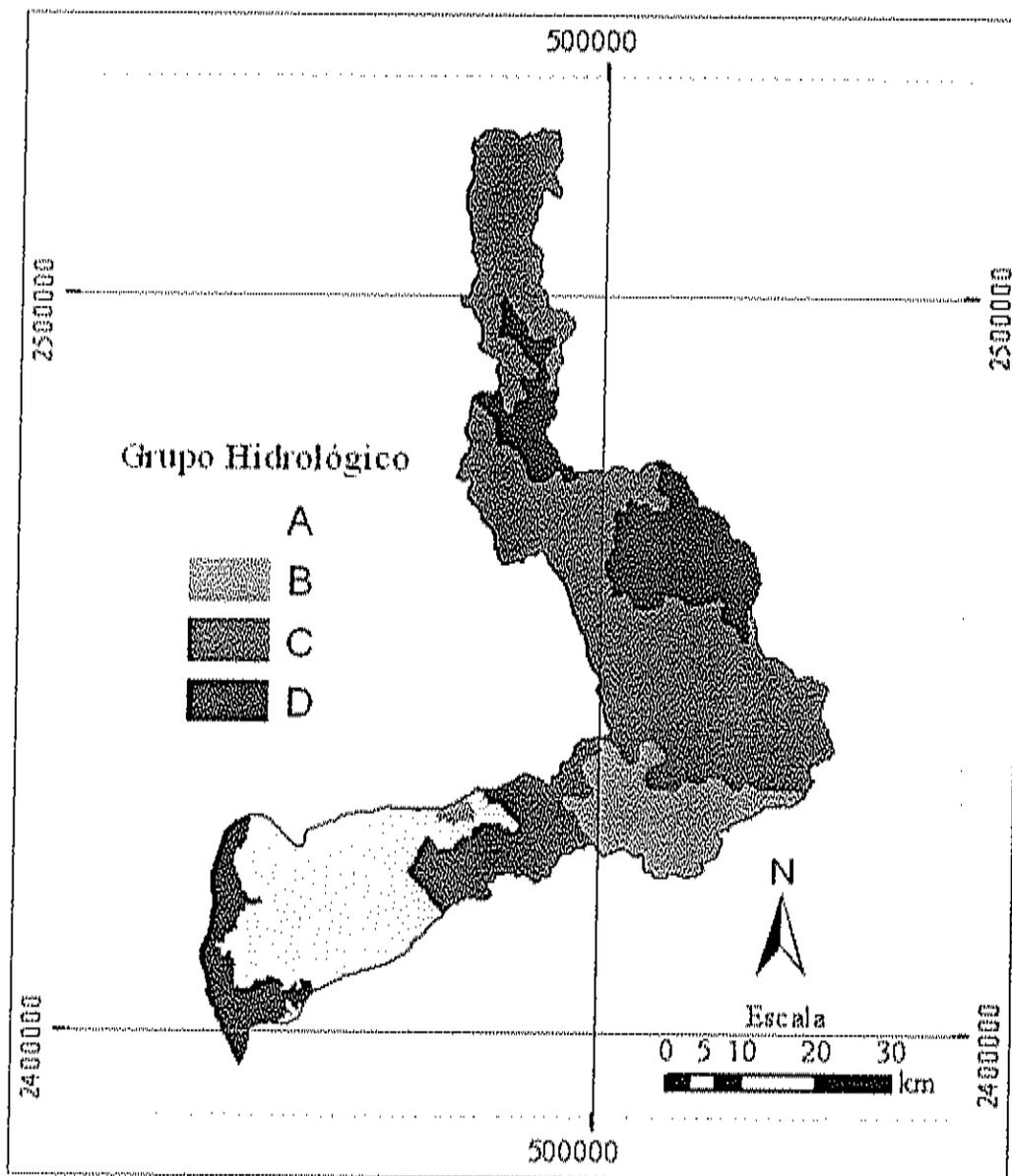


Fig. 13. Mapa temático de los Grupos Hidrológicos de Suelos de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México.

En México, el Regosol constituye el segundo tipo de suelo más importante por su extensión (19.2%). Frecuentemente son someros, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad (INEGI, 2005). En el área de estudio representó la clase dominante con un 29.2% (84,599 ha) y se localizó en la parte noreste en terrenos ocupados por Selva. El suelo que menos representación tiene es el Luvisol con apenas 1577 ha, y al igual que el Regosol, se localizó en la parte noroeste. De acuerdo a INEGI, estos suelos son muy abundantes, se destinan a muchos usos y sus rendimientos son variables pues dependen del clima donde se encuentre el suelo, en área de estudio están ocupados por Selva.

Con respecto al grupo hidrológico, más del 50% de la sub-cuenca presenta un moderado potencial de escurrimiento (tasa de infiltración baja) y está representado por el grupo C. Dado que este grupo hidrológico consiste principalmente de suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua, facilita la generación de escurrimiento en la cuenca. Como se mencionó en párrafos anteriores, sólo el 18.7% corresponde al grupo D, indicando que sólo esta pequeña porción de la sub-cuenca tiene un alto potencial de escurrimiento.

### **Escurrecimiento**

Contando con los mapas temáticos de Grupos Hidrológicos de Suelo y los mapas de Cobertura y uso del terreno de cada fecha, por procesos de sobreposición e intersección de capas en ArcGIS se generó un nuevo mapa cuya base de datos contenía la información de las dos capas anteriores. La asignación de los números de curva (CN) y determinación del escurrimiento se hizo automáticamente especificando la tabla índice del número de curva que utiliza la herramienta ArcCN-Runoff.

El número de curva refleja el potencial de escurrimiento directo que puede ser generado de un evento de precipitación sobre un complejo cobertura – grupo hidrológico dado, donde los números de curva altos (próximos a 100) corresponden a un alto potencial de escurrimiento. La porción de precipitación que no es calculada directamente

como escurrimiento se asume que se pierde por percolación y evaporación (Manguerra y Engel, 1998). El valor de CN es una función de la cobertura y uso del terreno, grupo hidrológico y condición del antecedente de humedad (USDA, 1986). Cada una de estas entradas puede ser altamente variable, a menudo haciendo difícil la asignación de los valores de CN para todas las áreas de una cuenca. Sin embargo, la determinación exacta de los números de curva es esencial cuando se aplica el método del NRCS-CN, particularmente para pequeños eventos de precipitación debido a que ligeras variaciones en el CN puede producir serios errores en los resultados (Hawkins, 1975).

Los mapas temáticos de los números de Curva de la sub-cuenca Río San Pedro, generados para cada fecha del análisis se muestran en la Fig. 14, donde se observa que es en la parte noreste del área de estudio, correspondiente a las zonas de mayor elevación, donde se presentan los valores de CN más altos dando como resultado un mayor potencial de escurrimiento. La parte baja de la sub-cuenca presenta valores de CN de 0 (no presenta potencial de escurrimiento), debido a la asociación de las clases Agua, Manglar y Marisma, que funcionan como depósitos una vez que la precipitación cae (Zhan y Huang, 2004). Estos autores consideran al agua, ríos, lagos y bahías con valor de 0 puesto que no es posible asignarles un grupo hidrológico. Estos resultados son diferentes a los obtenidos por Berlanga-Robles (2006) para la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste en el noroeste de México, donde se considera la clase Agua y Humedales con valor de CN de 100, asociado a un máximo potencial de escurrimiento, criterio que es compartido por diversos autores, pero que no fue adoptado en el presente trabajo por apego al modelo original propuesto por el USDA (1986).

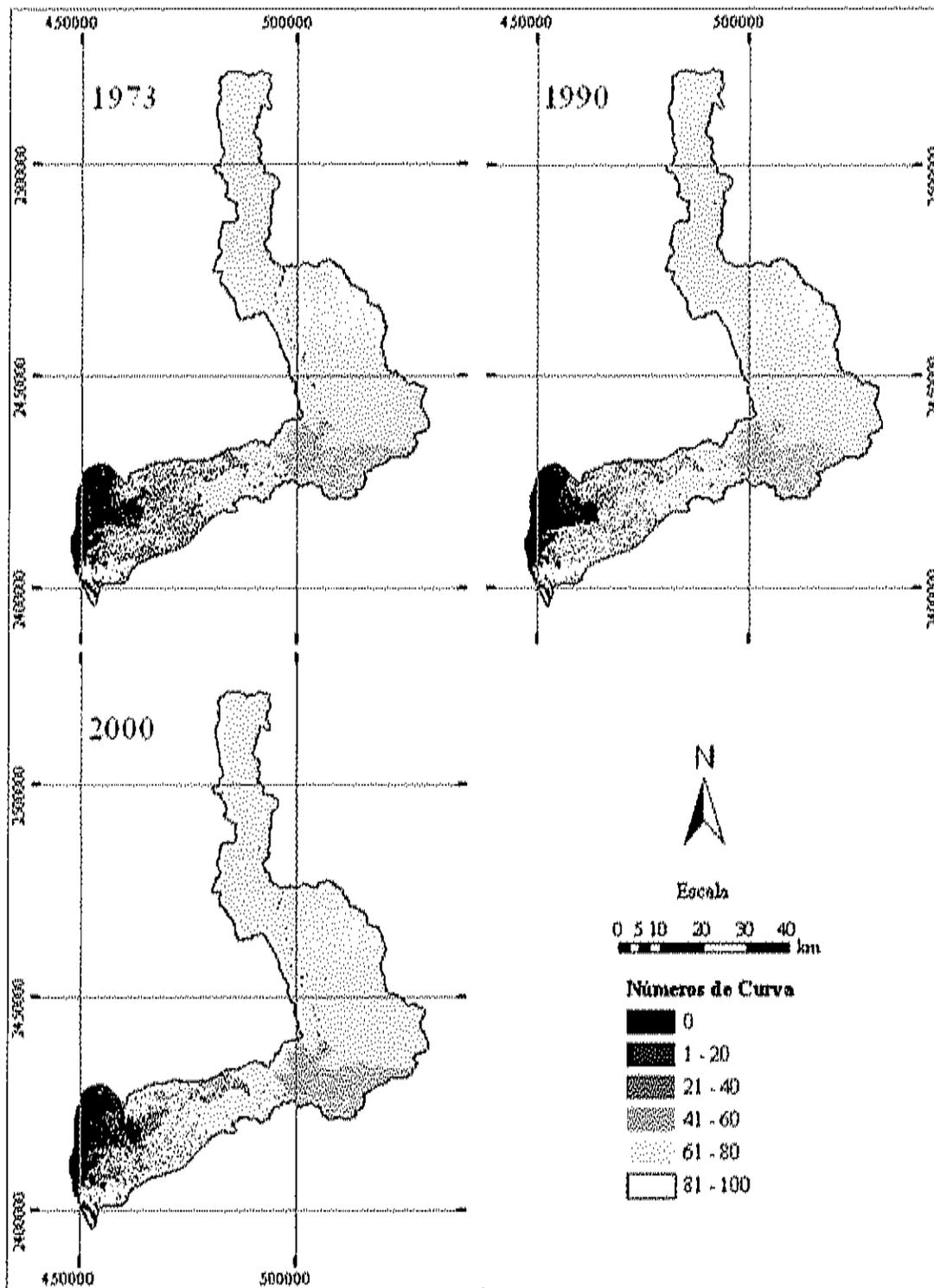


Fig. 14. Mapas temáticos de los números de Curva de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México, para las tres fechas de estudio.

Por otra parte, en la Fig. 15 muestra las áreas de la sub-cuenca bajo un número de curva determinado, donde excluyendo el valor de CN de 0, integra valores de 30 a 94, ya que no se observaron valores de CN en el intervalo de 1 a 20. Del histograma de números de curva generados a un intervalo de 20 unidades de 0 a 100, la cobertura del terreno de la imagen de 1973 muestra que 211,789 ha (73%) de la sub-cuenca tienen valores de CN entre 61 y 80 y sólo 19,133 ha (7%) tienen valores mayores de 81. Se observó un incremento para el año 1990, 225,555 ha (78%) de la sub-cuenca presentaba valores entre 61 y 80, y sólo 17,963 ha (6%) presentaron valores mayores de 81. De manera similar, para el 2000, los datos de cobertura indican que 219,721 ha (76%) de la cuenca tienen valores de CN entre 61 y 80 y sólo 12,023 ha (4%) tienen valores de CN mayores de 81. Lo anterior indica que aproximadamente el 75% de la cuenca tiene potencial de escurrimiento de moderado a alto para las tres fechas de estudio, y menos del 10% tiene un alto potencial de escurrimiento.

La Fig. 15 también muestra que aproximadamente 23,000 ha (8%) para las tres fechas de estudio, tienen una alta tasa de infiltración, con un valor de CN de 0. Melesse y Shih, (2002) examinaron números de curva para la sub-cuenca S-65A en Florida para tres fechas de estudio, y encontraron que no menos del 24% de la sub-cuenca tuvo valores de CN mayores de 81, diferentes con los resultados obtenidos en este estudio.

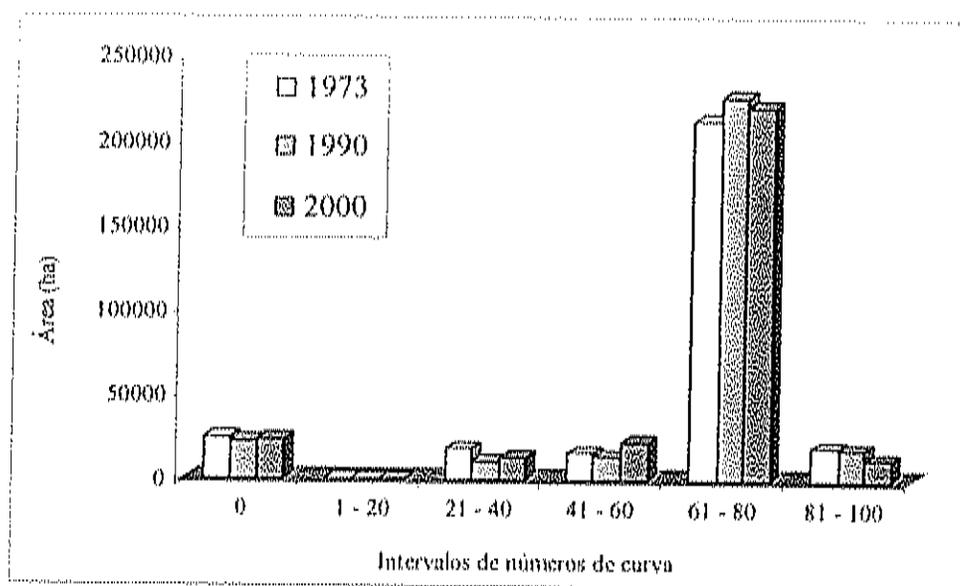


Fig. 15. Área de la Sub-cuenca Río San Pedro y su correspondiente clase del número de curva para las tres fechas de estudio.

Considerando que para cualquier modelo hidrológico es determinante su capacidad para estimar el escurrimiento, definir las características del escurrimiento de una cuenca es vital para el éxito de cualquier actividad de conservación de suelo-agua y la planeación ambiental ya que los procesos de escurrimiento gobiernan el transporte de sedimentos y contaminantes de fuentes no puntuales de contaminación agrícola tales como plaguicidas y nitratos. Esto hace del escurrimiento un prerequisite para una evaluación del impacto de la cuenca en el ambiente (Manguerra y Engel, 1998).

Con esa consideración se estimó esta variable, con base en una precipitación de 53.1 mm, que corresponde a un evento promedio de lluvia, para una serie de 30 años, donde sólo se incluyen los eventos con volúmenes igual o mayores que 25.4 mm. Aunado a lo anterior y con el objeto de efectuar un análisis más detallado en función de los tipos de cobertura presentes en el área de estudio, las clases selva y agricultura fueron reclasificadas atendiendo a la proporción de cobertura vegetal distribuida sobre las áreas ocupadas por estas coberturas. De esta manera se generaron tres subclases, denominadas Pobre, Regular y Buena, en función de la respuesta espectral generada,

obteniéndose la superficie de cada subclase en asociación con el respectivo CN (Tabla 12).

Las subclases Selva bajo el grupo hidrológico A y valores de CN menores o iguales a 45 fueron unidades que representaron bajo potencial de escurrimiento. Asociado al tipo de cobertura y densidad de la vegetación, éstas subclases retienen la mayor parte de la precipitación y en general permiten la recarga de los acuíferos de manera más eficiente. Por estas características, sería uno de los sitios recomendados con fines de conservación, dada la importante función que cumplen dentro del ciclo hidrológico en la región. A pesar de que existe preocupación de que se ponga en riesgo a esta cobertura a consecuencia del beneficio que ofrece a la agricultura la construcción de presas en el estado de Nayarit, la selva en la sub-cuenca Río San Pedro se encuentra distribuida principalmente en terrenos accidentados donde pudiera no ser factible el crecimiento de la frontera agrícola. En términos generales, todas las subclases de la categoría selva presentaron la mayor superficie, sin embargo los números de curva asociados y por lo tanto el potencial de escurrimiento, varían desde 30, en el caso anterior, hasta 83, en el caso de la subclase Selva (pobre), asociada al grupo hidrológico D.

Para un estudio similar llevado a cabo en el norte de Sinaloa, Berlanga-Robles (2006) examinó los cambios en el patrón de escurrimiento a consecuencia de cambios en el uso del terreno para 1973, 1986 y 2000. Durante ese periodo, encontró al complejo Agricultura – D con un número de curva asociado de 85 como el tipo de cobertura – grupo hidrológico dominante en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste.

En este estudio, para el mapa temático de 1973, el escurrimiento total fue de 25,384,851 m<sup>3</sup>, presentando el mayor escurrimiento bajo los complejos cobertura – grupo hidrológico: Selva (Pobre) – C y Selva (Bueno) – C, que representan el 18% y 13% del escurrimiento total, respectivamente. El año de 1990 presentó un escurrimiento de 26,719,589 m<sup>3</sup>, siendo Suelo desnudo (Pastizal) – C y Selva (Pobre) – C con un 22% y 12% respectivamente, los que tuvieron mayor contribución en la producción de escurrimiento. De forma similar para el año 2000, el volumen total de escurrimiento fue

de 25,804,309 m<sup>3</sup>. El complejo Cobertura del terreno y Grupo hidrológico con mayor escurrimiento fue: Selva (Regular) – C y Selva (Regular) – D con un 34% y 14% respectivamente.

**Tabla 12.** Volumen de escurrimiento (Q Vol) en la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México, estimado para un valor de Precipitación de 53.1 mm (2.09 pulgadas), en función del Grupo hidrológico de suelo (HSG) y número de curva (CN) asociado, para 1973, 1990 y 2000.

Uso del suelo			1973		1990		2000	
	HSG	CN	Área (ha)	Q Vol (m <sup>3</sup> )	Área (ha)	Q Vol (m <sup>3</sup> )	Área (ha)	Q Vol (m <sup>3</sup> )
Agrícola (Bueno)	A	74	8036.1	801590	13978.4	1394316	17162.2	1711900
Agrícola (Bueno)	B	83	178.1	34261	307.6	59163	113.7	21870
Agrícola (Bueno)	C	88	805.0	212293	2672.3	704697	760.2	200458
Agrícola (Bueno)	D	90	1860.8	553504	2536.3	754461	1413.5	420449
Agrícola (Pobre)	A	77	10333.9	1305396	7911.4	999390	8768.0	1107593
Agrícola (Pobre)	B	86	298.4	69555	140.3	32700	41.5	9681
Agrícola (Pobre)	C	91	669.2	211222	849.7	268213	184.7	58291
Agrícola (Pobre)	D	94	267.6	100662	141.9	53351	11.1	4183
Agrícola (Regular)	A	76	4861.6	568960	9435.1	1104210	3167.4	370683
Agrícola (Regular)	B	85	62.0	13562	300.1	65689	4.9	1079
Agrícola (Regular)	C	90	311.8	92757	659.8	196279	60.8	18083
Agrícola (Regular)	D	93	443.7	157451	57.8	20502	25.8	9159
Agua	A	0	6268.9	0	1877.9	0	2922.1	0
Agua	B	0	302.9	0	72.2	0	130.8	0
Agua	C	0	1051.7	0	233.1	0	548.7	0
Agua	D	0	2144.4	0	1918.7	0	2023.7	0
Manglar	A	0	3844.5	0	2802.8	0	4098.7	0
Manglar	D	0	6855.7	0	6849.9	0	7123.3	0
Marisma	A	0	3592.5	0	7655.5	0	5776.0	0
Marisma	D	0	506.2	0	540.1	0	350.2	0
Poblados	A	57	631.3	6667	891.6	9416	1058.6	11180
Poblados	B	72	31.3	2634	37.6	3162	47.7	4013
Poblados	C	81	313.9	52808	402.8	67772	458.5	77143
S desnudo	A	39	1020.3	0	2047.8	0	66.6	0
S desnudo	B	61	2450.4	56862	7739.4	179596	834.6	19368
S desnudo	C	74	28924.7	2885186	58508.9	5836153	15178.2	1513998
S desnudo	D	80	5326.3	836243	15957.9	2505413	4374.3	686767
Selva (Bueno)	A	30	7185.8	0	742.3	0	47.6	0
Selva (Bueno)	B	55	10758.6	65121	8612.9	52133	3346.7	20257
Selva (Bueno)	C	70	48308.5	3379529	39956.9	2795274	4828.7	337799
Selva (Bueno)	D	77	16108.4	2034847	10615.3	1340941	1281.5	161877
Selva (Pobre)	A	45	153.1	0	879.9	0	42.9	0
Selva (Pobre)	B	66	9898.3	454549	7742.8	355563	6179.3	283765

**Tabla 12.** Volumen de escurrimiento (Q Vol) en la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México (Continuación)

Uso del suelo			1973		1990		2000	
	HSG	CN	Área (ha)	Q Vol (m <sup>3</sup> )	Área (ha)	Q Vol (m <sup>3</sup> )	Área (ha)	Q Vol (m <sup>3</sup> )
Selva (Pobre)	D	83	13922.3	2677986	9894.2	1903179	8948.6	1721298
Selva (Regular)	A	36	565.5	0	55.1	0	3232.8	0
Selva (Regular)	B	60	4042.5	79194	2875.5	56333	16202.3	317410
Selva (Regular)	C	73	33600.2	3081926	18178.1	1667358	95874.8	8793965
Selva (Regular)	D	79	6270.3	917258	4030.2	589568	24971.3	3652970
V secundaria	A	35	9450.6	0	7681.8	0	9617.5	0
V secundaria	B	56	30.0	245	239.5	1953	1167.6	9522
V secundaria	C	70	390.5	27319	4820.5	337226	7469.5	522548
V secundaria	D	77	510.1	64439	1713.0	216391	3732.4	471481
<b>Escurrecimiento total</b>				<b>25384851</b>		<b>26719589</b>		<b>25804309</b>

Por lo que toca a la distribución espacial del escurrimiento, se observa una pequeña área donde el potencial de escurrimiento es mínimo y que corresponden a la región donde principalmente se ubican las coberturas de Selva y Humedales (Fig. 16). También es posible visualizar que el potencial de escurrimiento ha incrementado con el tiempo, siendo más evidente este proceso en la parte noreste de la sub-cuenca bajo la cobertura selva y en la zona de baja altitud, al sur de la zona de estudio, donde se da el mayor desarrollo de actividades de origen antropogénico, principalmente asociadas con agricultura. Esto podría tener implicaciones en términos de erosión contribuyendo cantidades significativas de nutrientes y sedimentación causando alteraciones en la cuenca y pérdida de hábitat.

En la Tabla 12 puede observarse que las clases Suelo desnudo (pastizal), Selva y Vegetación secundaria con el grupo hidrológico A (con valores de CN menores de 50) no produjo escurrimiento, lo cual en principio se debe al método empleado, ya que de acuerdo con el USDA (1986), una precipitación de 2 pulgadas con valores de CN menores o iguales a 50 no producen escurrimiento. Por otra parte, la precipitación es amortiguada por la selva y el pastizal disminuyendo la habilidad de la cobertura del terreno para producir escurrimiento.

Es importante mencionar que durante el periodo de estudio, a pesar de una disminución de la clase agua, se observó una conversión hacia Manglar y Marismas, las

cuales no contribuyeron en el volumen de escurrimiento debido a que tienen un valor de CN de 0, valor que fue determinado de acuerdo al método original aquí aplicado.

Por otra parte, aunque en términos relativos la clase Poblados es una de las que más crece durante el periodo de estudio, en términos de superficie ocupada, la diferencia es de poco más de 500 ha, por lo que el análisis de detección de cambio no indica una posible alteración de la respuesta hidrológica de la sub-cuenca incrementando su volumen de escurrimiento.

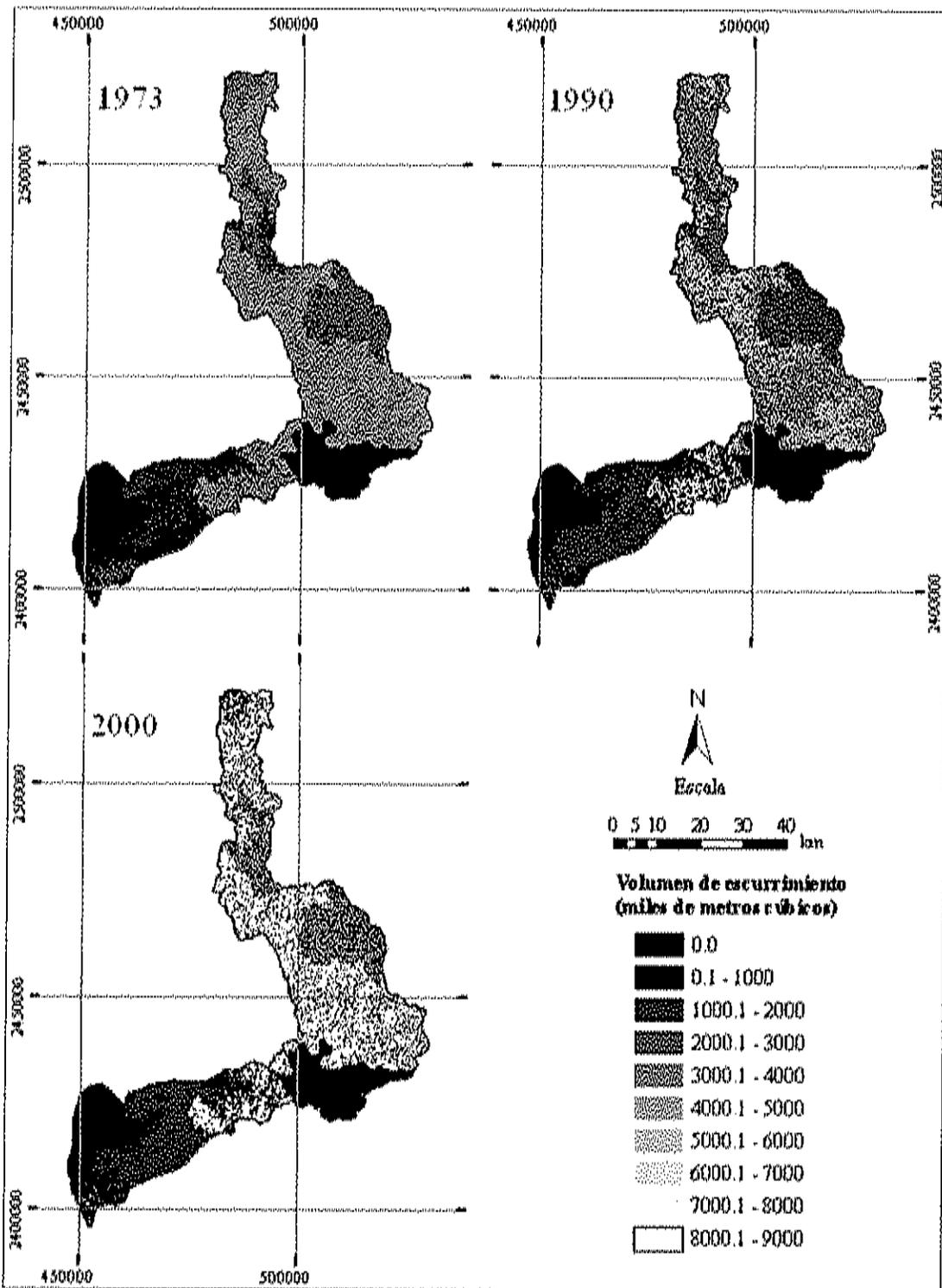


Fig. 16. Mapas temáticos del volumen de Escurrimiento (en miles de  $m^3$ ) de la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México.

Considerando que son varios los factores que provocan un cambio en el escurrimiento, como son la intensidad de la precipitación, pendiente y uso del terreno, es probable que el tipo de cobertura afecte directamente el escurrimiento como ha sido reportado en diferentes estudios (Melesse y Shih, 2002; Melesse *et al.*, 2003; Covarrubias, 2005; Berlanga-Robles, 2006). De acuerdo a los resultados anteriormente mencionados, el incremento en el escurrimiento es de alrededor de 1 millón de metros cúbicos en 1990 comparado con 1973 y 2000. Por lo tanto, la aparente ausencia de vegetación detectada en 1990, puede ser la causante de un incremento de la escorrentía, ya que la precipitación usada como insumo del modelo fue la misma para cada fecha.

De acuerdo a Rallison (1980), el método del número de curva es una herramienta predictiva valiosa cuando se utiliza para el tipo de problemas para los que fue desarrollado, es decir, para evaluar los efectos del cambio de uso del terreno y las prácticas de conservación en el escurrimiento directo. Bajo este esquema es que se desarrolló el presente trabajo, donde se dio énfasis a la detección de cambios de coberturas y usos del terreno, para lo que el análisis de imágenes de satélite resultó una fuente valiosa de información. Al igual que otros estudios que presentan un enfoque similar (Ragan y Jackson, 1980; Slack y Welch, 1980; Grove *et al.*, 1998; Melesse y Shih, 2002; Melesse *et al.*, 2003; Covarrubias, 2005; Berlanga-Robles, 2006), los resultados derivados del presente estudio permiten su integración a planes de manejo del recurso agua, a nivel de cuenca y también a unidades hidrológicas menores que pueden ser de utilidad para fines de administración del recurso en escalas menores tales como la de municipio.

#### Determinación de la Unidades de Respuesta Hidrológica

Dependiendo de sus características, las cuencas pueden dividirse en sub-cuencas naturales donde se preserva la dirección de flujo, los límites y canales para el flujo real del agua, sedimento y químicos. Estas sub-cuencas pueden ser representadas

alternativamente utilizando el concepto de *Unidades de Respuesta Hidrológica* (URH), que involucra la agregación de áreas asociadas con una única combinación de suelo y uso del terreno con respecto a su posición espacial dentro de la cuenca (Manguerra y Engel, 1998). Las URH son áreas con características hidrológicas similares y no necesariamente están contiguas o espacialmente relacionadas. Para caracterizar el comportamiento del escurrimiento de un área, pueden ser utilizadas varias de sus propiedades tales como uso del terreno, tipos de suelo, precipitación, topografía o la pendiente y el tipo de cobertura, siendo las dos últimas las empleadas en este estudio. El uso de URH permite tomar en cuenta diferentes características de un área utilizando varios parámetros para reflejar diferencias de los elementos característicos de cada unidad de respuesta (Heidinger, 2004) y a partir de su definición es posible obtener estimaciones de evapotranspiración, saturación de conductividad hidráulica, capacidad del suelo para la retención y potencial de recarga a partir de datos de campo y observaciones cuantitativas (Carlile *et al.*, 2002), parámetros de suma importancia para el manejo de los recursos hidráulicos.

Bajo la perspectiva anterior, las URH de la sub-cuenca Río San Pedro fueron derivadas por sub-división en zonas de pendientes y discriminación de cobertura y uso del terreno, obteniéndose los resultados que se presentan en la Tabla 13 y que en total incorporan 17 URHs. En términos generales, la mayor área de URH corresponde a zonas con pendientes reducidas ( $0 - 10^\circ$ ), que ocupan cerca de 45% del total del área de estudio, donde predominan las coberturas de selva y humedales. En ese orden siguieron las pendientes de  $11 - 20^\circ$  y  $21 - 40^\circ$ , que de manera global ocupan aproximadamente una cuarta parte de la zona, cada una.

Cabe mencionarse que con la base de datos SIG se delimitaron en total 23 URHs, pero algunas fueron muy pequeñas, por lo que se unieron con clases similares más grandes, reduciéndose a un total de 17 URH distribuidas sobre el área de estudio (Figura 17). Para el caso particular de corrientes fluviales, se obtuvo la URH más pequeña, con tan sólo 5 ha, asociadas a una pendiente elevada, mayor de  $40^\circ$ .

Tabla 13. Unidades de Respuesta Hidrológica delimitadas considerando la pendiente como factor principal y la cobertura y uso del terreno como factor secundario en la producción de escurrimiento. CN (Número de curva), Q (Volumen de escurrimiento).

URH	Uso del suelo	Tipo de suelo	HSG	Pendiente (°)		Área		CN	Prof Q (mm)	Q Vol (m <sup>3</sup> )	Q Vol/A (m <sup>3</sup> /ha)
				Intervalo	Promedio	(ha)	%				
1	Agrícola	Fluvisol (89%)	A	0-10	4	32732	11.4	84	21.73	4501280	138
2	Humedal	Fluvisol (57%)	A	0-10	4	21569	7.5	0	0.00	0	0
3	Poblados	Fluvisol (74%)	A	0-10	5	1701	0.6	70	8.64	84938	50
4	S desnudo	Cambisol (53%)	C	0-10	5	7459	2.6	72	9.49	776366	104
5	Selva	Cambisol (46%)	C	0-10	5	44966	15.6	70	8.98	3771920	84
6	V secundaria	Cambisol (36%)	C	0-10	4	19278	6.7	55	3.58	845467	44
7	Agro-Pob	Cambisol (61%)	C	11-20	14	155	0.1	82	19.44	30374	196
8	Agua	Cambisol (54%)	C	11-20	15	189	0.1	0	0.00	0	0
9	S desnudo	Cambisol (39%)	C	11-20	15	7686	2.7	72	9.60	843200	110
10	Selva	Regosol (43%)	C	11-20	15	63440	22.0	71	9.16	5954797	94
11	V secundaria	Cambisol (81%)	C	11-20	15	441	0.2	52	2.10	25343	57
12	Agua	Regosol (47%)	C	21-40	30	75	0.03	0	0.00	0	0
13	Sdes-Agro-Pob	Regosol (45%)	C	21-40	29	4344	1.5	74	11.09	489142	113
14	Selv-Vsec	Regosol (48%)	C	21-40	30	77078	26.8	71	9.33	8136392	106
15	Agua	Leptosol (43%)	D	41 y más	50	5	0.00	0	0.00	0	0
16	Sdes-Agro	Leptosol (44%)	D	41 y más	51	441	0.2	76	12.13	56759	129
17	Selv-Vsec	Leptosol (44%)	D	41 y más	51	6559	2.3	75	11.21	861955	131
Área total						288119				26377933	

URH 7. Agricultura y poblados  
 URH 13. Suelo desnudo, Agrícola y Poblados  
 URH 14. Selva y Vegetación secundaria  
 URH 16. Suelo desnudo y Agrícola  
 URH 17. Selva y Vegetación secundaria

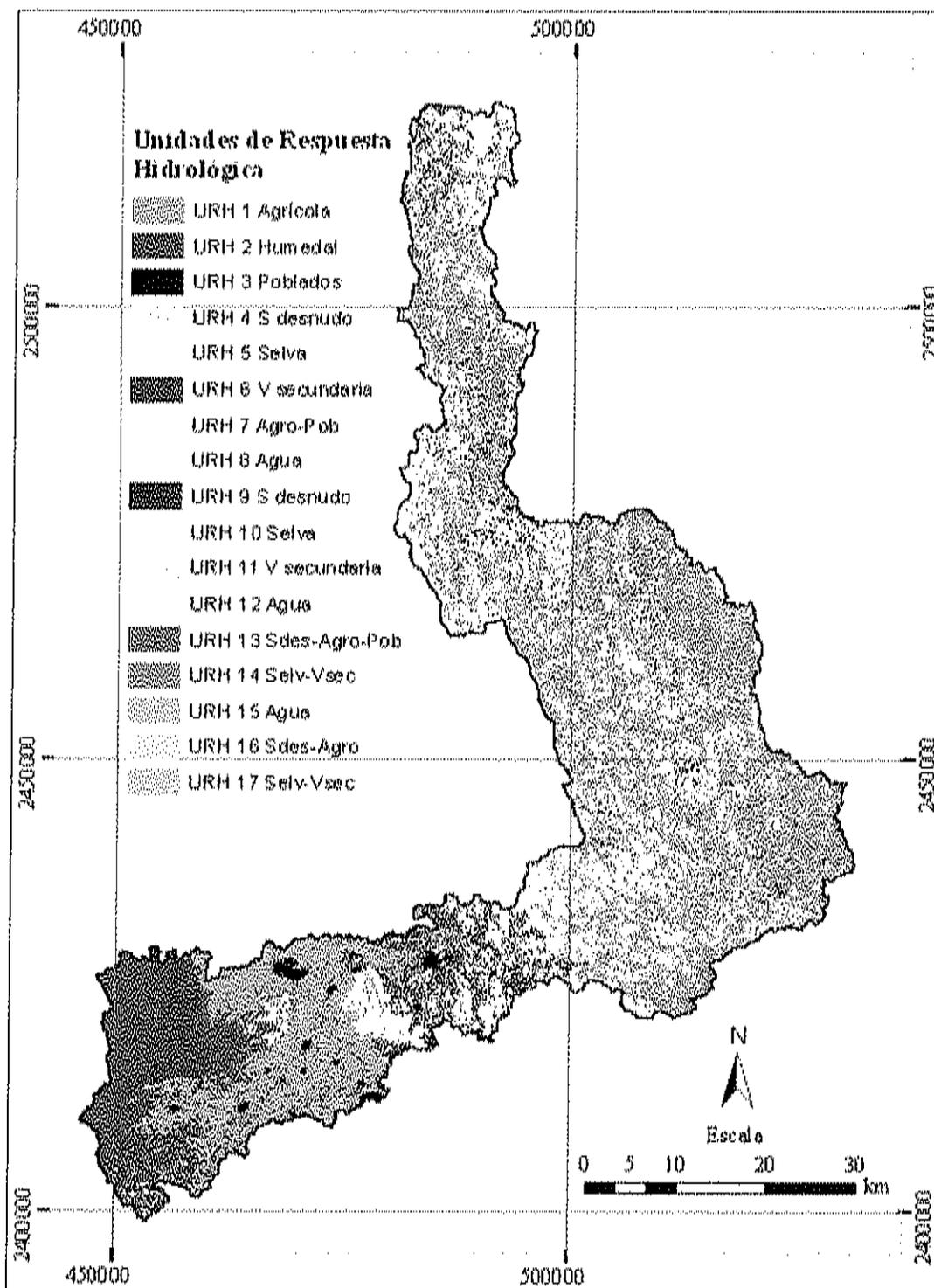


Fig. 17. Unidades de Respuesta Hidrológica delimitadas para la sub-cuenca Río San Pedro, Nayarit, México, considerando a la pendiente como factor primario y a la cobertura del terreno como factor secundario en la producción de escurrimiento.

Este tipo de análisis también permite determinar cuantitativamente el grado de variabilidad espacial en una sub-cuenca, ya que es posible comparar el número de combinaciones únicas de tipo de suelo y uso del terreno dentro de la sub-cuenca con la premisa de que una unidad hidrológica con más combinaciones únicas es más espacialmente variable (Manguerra y Engel, 1998).

Como ya se señala anteriormente, la tabla 12 muestra que la URH 14 (Selva-Vegetación secundaria) bajo pendientes entre 21 – 41 es la que ocupa mayor extensión en la sub-cuenca con un 27% (77,078 ha), y la URH 10 (Selva) con pendientes entre 10 – 20 ocupa el segundo lugar con 22% (63,440 ha). A pesar de que la clase Agrícola es una cobertura importante en la sub-cuenca, la URH 1 (Agrícola) en pendientes de 0 – 10, ocupa sólo un 11% (32,732 ha).

La subdivisión por uso del terreno fue debido a su obvia influencia en el escurrimiento, pero la pendiente es el factor primario, determinante para la producción de escurrimiento. Así, aunque la URH 14 (Selva-Vegetación secundaria) es la que mayor extensión ocupa en la sub-cuenca, la URH 7 (Agro – Pob) y la URH 1 (Agrícola) son las que presentan mayor escurrimiento por unidad de área (196 m<sup>3</sup>/ha y 138 m<sup>3</sup>/ha, respectivamente). De acuerdo a Flügel (1995), aunque la pendiente juega un papel importante en el escurrimiento, las clases naturales (Selva, Vegetación Secundaria) funcionan como una zona de amortiguamiento de la intensidad de precipitación. En ese sentido los resultados obtenidos durante el presente estudio son similares a los obtenidos por Flügel (1997), si bien este autor considera sólo tres intervalos de pendiente y tres tipos de cobertura del terreno. Cabe señalarse que aunque en los resultados se presentan URH correspondientes a Humedal (URH 2, 0 – 10°) y Agua, URH 8 (11 – 20°), URH 12 (21 – 40°), y URH 15 (> 40°), no producen escurrimiento dado que su valor de CN es 0.

Con base a los resultados obtenidos, la sub-cuenca Río San Pedro puede ser dividida hidrológicamente en dos secciones. La parte sur, una zona de bajo relieve con pendientes menores de 10 grados y clase agrícola como cobertura dominante; y la zona centro norte, una zona accidentada con pendientes mayores de 10 grados y dominada por la cobertura vegetal selva. Asimismo, la agricultura se encontrará en suelos

desarrollados fértiles en el piso del valle o en pendientes suaves, mientras que la Selva se distribuye en suelos más accidentados. Bajo esta presunción, la URH 1 estaría restringida para aumentar su extensión sobre las URH 4, URH 5, y URH 6. No así en la URH 2 ya que corresponde a una zona de inundación. Flügel (1996) menciona que el factor limitante para la resolución espacial dentro del concepto de URH es la capa SIG con la escala más pequeña. En la sub-cuenca Río San Pedro, ésta fue la cobertura y uso del terreno derivada de imágenes Landsat con tamaño del píxel de 30 metros, por lo que la unidad espacial más pequeña que puede ser derivada de esta cobertura tiene un área de 900 m<sup>2</sup>.

Con lo anterior concluyen los análisis relacionados con el presente trabajo, que en conjunto permiten determinar que las características físicas y parámetros evaluados con relación a al sub-cuenca Río San Pedro, fueron adecuadas y suficientes para determinar los volúmenes de escurrimiento dentro de la cuenca y los posibles efectos generados por los cambios de uso de suelo.

Al respecto es importante señalar que si bien en términos generales no se determinan cambios importantes en término de variación de la extensión por cobertura, sí se presenta una dinámica fuerte en cuanto a la distribución y permanencia de las coberturas, similar a la descrita para otras regiones, tanto a nivel nacional como internacional (Yuan y Elvidge, 1998; Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, 1999; Rogan et al., 2002; Prenzel y Treitz, 2004; Berlanga-Robles y Ruiz-Luna, 2002; Alonso-Pérez *et al.*, 2003; Yuan *et al.*, 2005; Berlanga-Robles, 2006; Monzalvo-Santos, 2006).

Como ya se ha mencionado anteriormente y particularmente asociado con la determinación de Unidades de Respuesta Hidrológica, que son consideradas como las unidades básicas o mínimas de manejo, tanto las coberturas, como las pendientes son parámetros básicos de los que depende la determinación del escurrimiento. Por lo anterior, la adecuada clasificación a partir de imágenes de satélite es un punto definitivo en el análisis, por lo que cabe recordarse, que por lo menos en lo que a la imagen registrada más recientemente, el análisis de validación de la clasificación permite un adecuado margen de confianza por lo menos en lo que a esta fecha se refiere.

Esta fase del trabajo es la única que estuvo sujeta a validación, ya que por una parte se hizo uso de productos generados por otras instancias (INEGI y la Universidad de Maryland), que normalmente siguen criterios estrictos para la elaboración de sus productos geográficos, pero que desafortunadamente no incluyen los márgenes de error para las diferentes escalas.

De acuerdo con Torres-Benites *et al.* (2005), la formulación de planes integrales de manejo de cuenca deben basarse en modelos hidrológicos confiables que permita estimar los escurrimientos y los problemas de erosión asociados a los usos actuales y futuros del suelo. Sin embargo los modelos deben ser calibrados y validados, ya que es posible la sub o sobreestimación de los resultados con base en datos simulados de precipitación y esto debe hacerse con base en datos puntuales de escurrimiento (Maldonado de León *et al.*, 2001; Torres-Benites *et al.*, 2005). Este tipo de calibración y validación no se efectuó durante el presente estudio por no ser parte de los objetivos, por carecerse de la información base necesaria para contrastar la predicción del modelo y también considerando lo señalado por Oreskes *et al.* (1994), quien indica que dado que los sistemas naturales no son cerrados y asumiendo que no existe un modelo único, la verificación o validación de los modelos numéricos no siempre es viable. Los modelos de sistemas naturales únicamente pueden confirmarse de manera parcial a través de la concordancia entre datos observados y los predichos. A pesar de que este paso es altamente recomendable, la precisión de los resultados del modelo depende de la precisión individual de cada uno de los mapas de entrada, que como se mencionó anteriormente para el presente trabajo, corresponden a una concordancia de sustancial a casi perfecta entre la clasificación y los datos de referencia.

Finalmente, es importante mencionar que más allá de los objetivos propuestos dentro del presente trabajo, la finalidad de este tipo de análisis es la de contribuir con elementos técnicos para mejorar los programas de manejo de cuencas y de sus recursos hidrológicos. Como es señalado por el INE (2005), las cuencas tienen una serie de componentes (hidrológicos, ecológicos, ambientales y socioeconómicos), que producen diversos usos, tales como la captación y almacenamiento de agua, así como su

distribución a través de la red hidráulica. Asimismo proveen de hábitat para la flora y fauna, la vegetación que sostienen constituyen sumideros de CO<sub>2</sub>, regulan la recarga hídrica y los ciclos biogeoquímicos y suministran recursos naturales para el desarrollo de actividades productivas que dan sustento a la población.

En ese sentido, los resultados que aquí se aportan contribuyen para comprender mejor algunos de los procesos determinantes en los procesos hidrológicos que se dan a nivel de cuenca. Son evidentes las limitaciones que este tipo de trabajos puede presentar y también es necesario considerar que prácticamente todos los análisis quedan sujetos a mejoría de los procesos, tanto para afinar los resultados individuales, como para mejorar los resultados del conjunto.

Ya se ha señalado anteriormente que el presente estudio muestra diferencias con respecto al trabajo realizado por otros autores, aún en zonas próximas como es el caso del estudio llevado a cabo por Berlanga-Robles (2006), pero también existen coincidencias metodológicas y conclusiones similares que permiten interpretar que hay procesos que son compartidos por sistemas afines. Aunado a lo anterior, el resultado final del presente trabajo, propuesto en formato de SIG, permite la incorporación inmediata de nuevos datos, facilitando con esto la actualización y manejo de la información. De igual manera, el contar con la información dispuesta en formato de SIG, facilita la comparación con otros esquemas o modelos, lo que redundará en la conformación de planes de manejo cada vez más robustos y soportados por información más consistente y confiable.

---

## CONCLUSIONES

---

### CAPÍTULO 6

La estructura de drenaje muestra un alto grado de coherencia con los resultados producidos mediante técnicas distintas de la empleada en el presente estudio, resultando esta última más económica en términos del tipo de insumos y tiempo dedicado para su elaboración.

De los resultados se desprende que el drenaje del río San Pedro, corresponde a una corriente importante definida por un orden de drenaje de 7 y fluye por el centro de la sub-cuenca, con dirección norte-sur cambiando su orientación hacia el oeste en la fracción sur de la sub-cuenca. El drenaje sigue un patrón dendrítico típico, dominado por afluentes de orden 1, normalmente considerados como arroyos intermitentes y además del cauce principal, sólo dos corrientes son de sexto orden y nueve corresponden a arroyos de quinto orden.

Se delimitaron 58 sub-unidades en total dentro de la sub-cuenca, de las cuales 53 pueden clasificarse como cuencas pequeñas y 5 como cuencas medianas. Considerando el índice de compacidad, todas estas sub-unidades pueden presentar una retardada respuesta al escurrimiento. Esto hizo de los MDE una fuente de información útil para determinar automáticamente los límites de una cuenca con alto grado de confiabilidad.

Dos terceras partes de la sub-cuenca se encuentran caracterizadas principalmente por selva, presente en esa proporción en las tres fechas de estudio. A pesar de que la agricultura es una clase importante, ocupa sólo un 11 % del área estudiada.

En el presente estudio, las diferencias en las condiciones durante el registro de las imágenes Landsat podría ser responsable de las tendencias irregulares de los cambios en

el paisaje, como la recuperación de la clase selva en el 2000 comparada con la clasificación de 1990.

Se determinaron en total 17 URHs, de las cuales la URH 14 Selva con pendientes ente 21 – 40° es la que ocupa mayor extensión en la sub-cuenca, pero es la URH 7 Agrícola sobre pendientes entre 11 – 20° la que tiene mayor escurrimiento por unidad de área.

Los resultados del presente trabajo contribuyen para implementar planes de manejo de recursos naturales, ya sea a nivel cuenca, de complejo cobertura del terreno – grupo hidrológico o a nivel de unidades de respuesta hidrológica.

---

## RECOMENDACIONES

---

### CAPÍTULO 7

Se sugiere incorporar nuevas fuentes de información que permitan validar y mejorar los resultados derivados del uso de Modelos Digitales de Elevación producidos por INEGI, particularmente para la región de bajo relieve de la sub-cuenca.

Se sugiere el empleo de métodos alternativos del D8 (*Deterministic eight*), que permita mejorar la determinación de la dirección de flujo e integrar la información de localización de lagunas y otros cuerpos de agua a los modelos digitales de elevación para reducir los errores generados por la simulación arbitraria de la dirección de flujo en estas zonas.

Es conveniente realizar actualizaciones de este tipo de evaluaciones con periodicidad mínima de 10 años, para mantener un seguimiento de la dinámica de las coberturas y usos del terreno y sus efectos en el volumen de escurrimiento de la sub-cuenca.

La selección de imágenes de satélite debe hacerse en función de criterios específicos que permitan minimizar el error debido a diferencias estacionales y fenológicas. Opcionalmente se puede realizar un estudio que incluya el efecto de las variaciones estacionales.

Con respecto al método del número de curva, introducir mayor variabilidad en la precipitación considerando polígonos de Thiessen para simular el área de influencia de la tormenta en el cálculo del volumen de escurrimiento.

Estimar los efectos del escurrimiento en la pérdida de suelo determinando el arrastre de sedimentos por los causes de la sub-cuenca.

Estudiar con más detalle los cambios en la cobertura y uso del terreno así como el volumen de escurrimiento para cada unidad de respuesta hidrológica y determinar en cual de ellas se presenta mayor erosión.

## BIBLIOGRAFÍA

- \* Acosta-Velázquez, J. 2003. *Análisis de la condición del bosque de manglar en el Sistema Lagunar Teacapán-Agua Brava-Marismas Nacionales y sus relaciones a nivel de paisaje*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C., México. 81 pp.
- \* Alonso-Pérez, F., A. Ruiz-Luna, J. Turner, C. A. Berlanga-Robles, y G. Mitchelson-Jacob. 2003. *Land cover changes and impact of shrimp aquaculture on the landscape in the Ceuta coastal lagoon system, Sinaloa, Mexico*. *Ocean & Coastal Management*, 46: 583-600
- \* Anderson, J. R., E. E., Hardy, J. T., Roach, y R. E. Wiltmer. 1976. *A land-use and land-cover classification system for use with remote sensor data*. *US Geological Survey Professional Paper 964*, Washington, DC.
- \* Anonymous. 1990. *Watershed Atlas of India*. New Delhi: All India Soil and Landuse Survey Organization, Department of Agriculture and Cooperation, Ministry of Agriculture. En: Moharana, P. C. y A. Kar. 2002. Watershed simulation in a sandy terrain of the Thar desert using GIS. *Journal of Arid Environments*, 51: 489-500
- \* Auerswald, K. y J. Haider. 1996. *Runoff curve numbers for small grain under German cropping conditions*. *Journal of Environmental Management*, 47: 223-228
- \* Berlanga-Robles, C. A. 2006. *Caracterización de los paisajes costeros de Sinaloa y norte de Nayarit, México a través del análisis de los patrones de cobertura del terreno*. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. 204 pp.
- \* Berlanga-Robles, C. A. y A. Ruiz-Luna. 2002. *Land use mapping and change detection in the coastal zone of Northwest Mexico using remote sensing techniques*. *Journal of Coastal Research*, 18 (3) 514-522
- \* Bocco, G. 2004. *Cartografía y sistemas de información geográfica en el manejo integrado de cuencas*. 41-49. En: Cotler, E. (comp.). 2004. El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. 264 pp. ISBN 968-817-700-8

- \* Brown, J. R., R. L. Ulery, y J. W. Parcher. 2000. *Creating a Standardized Watersheds Database for the Lower Río Grande/Río Bravo, Texas*. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. Open-File Report 00-065
- \* Campbell, J. B. 2002. *Introduction to Remote Sensing, Third edition*. The Guilford Press, New York, 621 pp.
- \* Carlile, P. W., A. J. Jakeman, B. F. W. Croke y B. G. Lees. 2002. *Use of Catchment attributes to identify the scale and values of distributed parameters in surface and sub-surface conceptual hydrology models, integrated assessment and decision support*. En línea: <http://www.iemss.org/iemss2002/proceedings/vol1.html/>, International Environmental Modelling and Software Society, 1: pp 346-351
- \* Chuvieco, E. 1996. *Fundamentos de teledetección espacial*. Tercera edición revisada. Madrid (España), Rialp, S.A. 568 pp.
- \* Congalton, G. C. y K. Green. 1999. *Assessing the accuracy of remote sensed data: Principles and practices*. Lewis publishers. Florida, USA. 137 pp.
- \* Cotler, H. y A. Priego. 2004. *El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: el caso de la cuenca Lerma-Chapala*. 63-74. En: Cotler, E. (comp.). 2004. *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. 264 pp. ISBN 968-817-700-8
- \* Covarrubias, L. H. O. 2005. *Alteración en los escurrimientos en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa asociados a los cambios de cobertura y uso del terreno*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. 44 pp.
- \* CWM. 1999. Committee on Watershed Management (CWM), National Research Council. *New Strategies for America's Watersheds*. 328 pp. ISBN: 0-309-51771-0
- \* Czaplewski, R. L., 2003. *Accuracy assessment of maps of forest condition: statistical design and methodological considerations*. En: Treitz, P. y J. Rogan. 2004. *Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change - an introduction*. *Progress in Planning*, 61: 269-279
- \* Díaz, C., K. Mamadou, A. Iturbide, M. V. Esteller y F. Reyna. 1999. *Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: Caso del Curso Alto del Río Lerma, Estado de México*. Universidad Autónoma del Estado de México. *Ciencia Ergo Sum*, 6 (2): 124-134.

- \* Eastman, J. R. 2003. *Guide to GIS and Image Processing*. Clark University, USA, 306 pp
- \* Ellassal, A. A. y V. M. Caruso. 1983. *USGS Digital Cartographic Data Standards, Digital Elevation Models*. Geological Survey Circular 895-B, 40 pp.
- \* ESRI. 2004. Environmental System Research Institute. ArcGis Desktop 9.0 Help. GIS Dictionary.
- \* Fahasi, A., T. Tsegaye, W. Tadesse y T. Coleman. 2000. *Incorporation of digital elevation models with Landsat-TM data to improve land cover classification accuracy*. *Forest Ecology and Management*, 128: 57-64
- \* FAO. 2002. *Land and Water development division. Key to the FAO Soil Units in the FAO/UNESCO Soil Map of the World*. [En línea]. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/key2soil.stm>
- \* FAO, ISRIC e ISSS. 1998. *World reference base for soil resources. World Soil Resources Report – 84*
- \* Felicísimo, A. M. 1994. *Modelos Digitales del Terreno*. Oviedo (España): Pentalfa. 112 pp. ISBN: 84-7848-475-2
- \* Fennessey, L. A. J., A. C. Miller y J. M. Hamlett, 2001. *Accuracy and precision of NRCS models for small watersheds*. *Journal of the American Water Resources Association*. *American Water Resources Association*, 37 (4): 899-912
- \* Flügel, W. A. 1995a. *Delimiting hydrological response units by Geographical Information System analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany*. *Hydrological Processes*, 9: 432-436.
- \* Flügel, W. A. 1995b. *Hydrological response units (HRUs) to preserve basin heterogeneity in hydrological modelling using PRMS/MMS – case study in the Bröl basin, Germany*. *Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resource Systems (Proceedings of a Boulder Symposium, July 1995)*, IAHS Publ. no. 231, 79-87
- \* Flügel, W. A. 1996. *Hydrological Response Units (HRUs) as modelling entities for hydrological river basin simulation and their methodological potential for modelling complex environmental process systems. Results from the Sieg catchment*. *Die Erde*, 127: 43–62

- \* Flügel, W. A. 1997. *Combining GIS with regional hydrological modelling using hydrological response unit (HRUs): an application from Germany*. *Mathematics and Computers in Simulations*, 43: 297-304
- \* Flügel, W. A., y T. H. Lüllwitz. 1993. *Using a distributed hydrologic model with the aid of GIS for comparative hydrological modelling of micro- and mesoscale catchments in the USA and Germany*. *Macroscale Modelling of the Hydrosphere (Proceedings of the Yokohama Symposium)*. IAHS Publ. No. 214. 59 – 66
- \* Garbrecht, J. y L. W. Martz. 1997. *The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models*. *Journal of hydrology*, 193: 204-213
- \* Garbrecht, J. y L. W. Martz. 1999. *Digital elevation model issues in water resources modeling*. *Proceeding at the 19th annual ESRI International user conference in San Diego, California*. [En línea] <http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap866/p866.htm>
- \* Green, E. P., P. J. Mumby, A. J. Edwards y C. D. Clark. 1996. *A review of remote sensing for the assessment and management of tropical coastal resources*. *Coastal Management*, 24: 1-40
- \* Grove, M., J. Harbor y B. Engel. 1998. *Composite vs distributed curve numbers: effects on estimates of storm runoff depths*. *Journal of the Water Resources Association*. *American Water Resources Association*, 34 (5): 1015-1023
- \* Guertin, D. P., S. N. Miller y D. C. Goodrich. 2000. *Emerging Tools and Technologies in Watershed Management*. *USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-13*. 194-204
- \* Halley, M. C. P. E., S. O. White y E. W. Watkins P. E. 2004. *ArcView GIS Extension for Estimating Curve Numbers*. [En línea]. <http://gis.esri.com/library/userconf/proc00/professional/papers/PAP657/p657.htm>
- \* Hawkins, R. H. 1975. *The importance of accurate curve numbers in the estimation of storm runoff*. *Water Resources Bulletin*. *American Water Resources Association*, 11 (5): 887-891
- \* Hawkins, R. H. 1980. *Infiltration and curve numbers: some pragmatics and theoretic relationships*. *Watershed Management*, 925-937
- \* Heidinger, M. 2004. *Developments for a semi-distributed runoff modeling system and its application in the drainage basin Ötztal*. Tesis de Posgrado. Leopold-Franzens-Universität Innsbruck. Pp. 35-39

- \* Helmschrot, J. y W.-A. Flügel. 2002. *Land use characterisation and change detection analysis for hydrological model parameterisation of large scale afforested areas using remote sensing*. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 711–718
- \* Hjelmfelt, J. A.T. 1991. *Investigation of curve number procedure*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117 (6): 725-737
- \* INE. 2005. *Cuencas hidrológicas. Conceptos*. [En línea] <http://www.ine.gob.mx/dgoeccc/cuencas/conceptos.html>
- \* INEGI. 1999. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Síntesis de información geográfica del estado de Nayarit. Pp. 45-47
- \* INEGI. 2005. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. [En línea] <http://www.inegi.gob.mx>
- \* Jain, M. K. y V. P. Singh. 2005. *DEM-based modelling of surface runoff using diffusion wave equation*. *Journal of Hydrology*, 302: 107–126
- \* Jenson, S. y J. Domingue. 1988. *Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (11): 1593-1600
- \* Khan, M. A., V. P. Gupta y P. C. Moharana. 2001. *Watershed prioritization using remote sensing and geographic information system: a case study from Guhiya, India*. *Journal of Arid Environments*, 49: 465-475
- \* Koka, S. 2004. *Integration of Stream and Watershed Data for Hydrologic Modeling*. Tesis de Maestría. Texas A&M University. 136 pp.
- \* Kokkonen, T. S. y A. J. Jakeman. 2002. *Structural effects of landscape and land use on streamflow response*. In *Environmental Foresight and Models: A Manifesto*, M. B. Beck (ed.) (Amsterdam: Elsevier) pp. 303-321.
- \* Kovacs, J. M., J. Wang y M. Blanco-Correa. 2001. *Mapping mangrove disturbances using multi-date Landsat TM imagery*. *Environmental Management*, 27: 763–776.
- \* Landis, J. R. y G. G. Koch. 1977. *The measurement of observer agreement for categorical data*. *Biometrics*, 33 (1): 159-174
- \* Leavesley, G. H., S. L. Markstrom, P. J. Restrepo y R. J. Viger. 2002. *A modular approach to addressing model design, scale, and parameter estimation issues in distributed hydrological modeling*. *Hydrological Processes*, 16: 173-187

- \* Lee, Y. 2004. *Digital Elevation Models: Issues of Data Accuracy and Applications*. [En línea]. <http://gis.esri.com/library/userconf/proc96/TO150/PAP145/P145.HTM>
- \* Liakath, A. 2002. *An Integrated Approach for the Improvement of Flood Control and Drainage Schemes in the Coastal Belt of Bangladesh*. Tesis de doctorado. Wageningen University. 219 pp.
- \* Lillesand, T. M., R. W. Kiefer y J. W. Chipman. 2004. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Fifth edition. John Wiley & Sons, Inc. 763 pp. ISBN 0-471-15227-7
- \* Lin, W-T., W.-C. Chou, D.-Y. Lin, P.-H Huang y J.-S Tsai. 2006. *Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds. Hydrological processes*, 20: 289-306
- \* Maidment, D. R. 1996. *GIS and hydrologic modeling – an assessment of progress. Proceeding at the third International Conference on GIS and Environmental Modeling*. Santa Fe, New Mexico. [En línea] <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/meetings/santafe/santafe.htm>
- \* Maldonado de León, O. A., O. L. Palacios-Velez, J. L. Oporeza-Mota, R. Springall-Galindo y D. S. Fernández-Reynoso. 2001. *Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca Itzapa, Guatemala. ENSAYO en Agrociencia*, 35: 335-345.
- \* Martz, L. W. y J. Garbrecht. 1998. *The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models. Hydrological processes*, 12: 843-855
- \* Melesse, M. A. y S. F. Shih. 2002. *Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS. Computers and Electronics in Agriculture*, 37: 173 -183
- \* Melesse, M. A., W. D. Graham y J. D. Jordan. 2003. *Spatially distributed watershed mapping and modeling: GIS-based storm runoff response and hydrograph analysis: part 2. Journal of Spatial Hydrology*, 3 (2): 1-28
- \* Moharana, P. C. y A. Kar. 2002. *Watershed simulation in a sandy terrain of the Thar desert using GIS. Journal of Arid Environments*, 51: 489–500
- \* Montgomery, D. R. y W. E. Dietrich. 1992. *Channel initiation and the problem of landscape scale. Science*, 255: 826-830
- \* Monzalvo-Santos, I. K. 2006. *Estimación de la cobertura espacial y análisis de la estructura forestal del manglar en Sinaloa, México, aplicando técnicas de Percepción*

- Remota*, Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, 85 pp.
- \* Morad, M. y A. Triviño. 2001, *Sistemas de Información Geográfica y modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación*. Boletín de la A.G.E. N° 31. 23-46
- \* Nayak, T. R. y R. K. Jaiswal. 2003. *Rainfall-Runoff Modelling using Satellite Data and GIS for Bebas River in Madhya Pradesh*. *IE (I) Journal-CV*, 8: 47-50
- \* Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry y J. R. Williams. 2002. *Soil and Water Assessment Tool, theoretical documentation and user's manual, Version 2000*. Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Grassland, 808 East Black Land Road, Temple, Texas.
- \* O'Callaghan, J. F. y D. M. Mark. 1984. *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28: 323-344
- \* Oreskes, N., K. Shrader-Frechette y K. Belitz. 1994. *Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences*. *Science*, 263 (5147): 641-646
- \* Ponce, V. M. 1989. *Engineering hydrology. Principles and Practices*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- \* Ponce, V. M. y R. H. Hawkins. 1996. *Runoff curve number: has it reached maturity?*. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1 (1): 11-19.
- \* Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier y O. Planchon. 1991. *The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models*. *Hydrological Processes*, 5: 59-79.
- \* Prenzel, B. 2004. *Remote sensing-based quantification of land-cover and land-use change for planning*. *Progress in Planning*, 61: 281-299
- \* Prenzel, B. y P. Treitz. 2004. *Remote sensing change detection for a watershed in north Sulawesi, Indonesia*. *Progress in Planning*, 61: 349-363.
- \* Ragan, R. M. y T. J. Jackson. 1980. *Runoff synthesis using Landsat and SCS model*. *Journal of the Hydraulics Division*, 667 - 678
- \* Rallison, R. E. 1980. *Origin and evolution of the SCS runoff equation*. *Watershed Management*, 912-924

- \* Rogan, J. y D. M. Chen. 2004. *Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change*. *Progress in Planning*, 61: 301–325
- \* Rogan, J., J. Franklin, D. A. Roberts. 2002. *A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery*. *Remote Sensing of Environment*, 80: 143 – 156
- \* Rogan, J., J. Miller, D. Stow, J. Franklin, L. Levien, y C. Fischer. 2003. *Land cover change mapping in California using classification trees with Landsat TM and ancillary data*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69 (7):793 – 804
- \* Ruiz-Luna, A. y C. A. Berlanga-Robles. 1999. *Modifications in Coverage Patterns and Land Use around the Huizache-Caimanero Lagoon System, Sinaloa, Mexico: A Multi-temporal Analysis using LANDSAT Images*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49: 37–44
- \* Ruiz-Luna, A. y C. A. Berlanga-Robles. 2003. *Land use, land cover changes and coastal lagoon surface reduction associated with urban growth in northwest Mexico*. *Landscape Ecology*, 18: 159-171
- \* Ruiz-Luna, A., C. A. Berlanga Robles y J. Acosta-Velázquez. 2005. *Bases para el ordenamiento ecológico de la zona costera del norte de Nayarit, México*. Semana Geomática Barcelona "Los sensores de alta resolución y sus aplicaciones". 8-11 de febrero 2005, Barcelona, España. (Extenso G18.pdf) [http://www.semana-geomatica.com/front/abstracts/Dimarts8/G18\\_abs.pdf](http://www.semana-geomatica.com/front/abstracts/Dimarts8/G18_abs.pdf)
- \* Ruiz-Luna, A., J. Acosta-Velázquez y C. A. Berlanga-Robles. (Sometido a revista Ciencia y Universidad). *Consideraciones sobre las estimaciones de la extensión y del estado actual de los manglares en México*.
- \* Sabins, F. F. 1999. *Remote Sensing: Principles and Interpretation*. Third edition. W. H. Freeman Company, New York. 494 pp. ISBN 0-7167-2442-1
- \* SAGARPA. 2005. *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*.
- \* Schmutge, T. J., W. P. Kustas, J. C. Ritchie, T. J. Jackson y A. Rango. 2002. *Remote sensing in hydrology*. *Advances in Water Resources*, 25: 1367–1385
- \* Sharma, T., P. V. Satya K., T. P. Singh, A. V. Trivedi y R. R. Navalgund. 2001. *Hydrologic response of a watershed to land use changes: a remote sensing and GIS approach*. *International Journal of Remote Sensing*, 22 (11): 2095–2108

- \* Shirmorhammadi, A., K. S. Yoon, W. J. Rawls y O. H. Smith. 1997. *Evaluation of curve number procedures to predict runoff in GLEAMS*. *Journal of the American Water Resources Association*, American Water Resources Association, 33 (5): 1069-1076
- \* Schultz, G. A. 1988. *Remote sensing in hydrology*. En: Singh, V. P. 1995. "Chapter 1: Watershed modeling." *Computer models of watershed hydrology*, V. P. Singh, ed., Water Resources Publications, Littleton, Colo., 1-22
- \* Singh, A. 1989. *Digital change detection techniques using remotely-sensed data*. *International Journal of Remote Sensing*, 10 (6) 989-1003
- \* Singh, V. P. 1995. "Chapter 1: Watershed modeling." *Computer models of watershed hydrology*, V. P. Singh, ed., Water Resources Publications, Littleton, Colo., 1-22
- \* Singh, V. P. y D. A. Woolhiser. 2002. *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*. *Journal of Hydrologic Engineering*, 270-292
- \* Slack, R. B. y R. Welch. 1980. *Soil conservation service runoff curve number estimates from Landsat data*. *Water Resources Bulletin*. American Water Resources Association, 887- 893
- \* Swensson, M. T. 2003. *Refinements on a GIS-based, spatially distributed rainfall-runoff model for a small watershed*. Tesis de Maestría. University of Pittsburgh. 125 pp.
- \* Tarboton, D. G. 1997. *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. *Water resources research*, 33 (2): 309-319
- \* Torres-Benites, E., E. Mejía-Sáenz, J. Cortés-Becerra, E. Palacios-Vélez y A. Exebio-García. 2005. *Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México*. *ENSAYO en Agrociencia*, 39: 481-490.
- \* Treitz, P. y J. Rogan. 2004. *Remote sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change - an introduction*. *Progress in Planning*, 61: 269-279
- \* Tribe, A. 1992. *Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method*. En: Turcotte, T., J.-P. Fortin, A. N. Rousseau, S. Massicotte y J.-P. Villeneuve. 2001. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, 240: 225-242

- \* Turcotte, T., J.-P. Fortin, A. N. Rousseau, S. Massicotte y J.-P. Villeneuve. 2001. *Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network*. *Journal of Hydrology*, 240: 225-242
- \* Universidad Autónoma de Nayarit. 2004. *Ordenamiento territorial del estado de Nayarit*. CUVEDES-UAN, 494 pp.
- \* U. S. Department of Agriculture. 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division, Technical Release 55. Second Edition. USA, 164 pp.
- \* U. S. Geological Survey. 1997. "*Watershed Research in the U.S. Geological Survey*". Committee on U.S. Geological survey, National Research Council. 96 pp. ISBN: 0-309-59034-5
- \* U. S. Soil Conservation Service (SCS). 1972. *National engineering handbook. Section 4- Hydrology*. Washington, D.C.
- \* Vogt, J. V., R. Colombo y F. Bertolo. 2003. *Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics*. *Geomorphology*, 53: 281-298
- \* Wang, X. y Z.-Y. Yin. 1998. *A comparison of drainage networks derived from digital elevation models at two scales*. *Journal of hydrology*, 210: 221-241
- \* Weng, Q. 2001. *Modeling Urban Growth Effects on Surface Runoff with the Integration of Remote Sensing and GIS*. *Environmental Management*, 28 (6): 737-748
- \* WWDR1. 2003. UN/WWAP (United Nations/World Water Assessment Programme). *1<sup>st</sup> UN World Water Development Report: Water for People, Water for Life*. Paris, New York and Oxford. UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) and Berghahn Books.
- \* WWDR2. 2006. UN/WWAP (United Nations/World Water Assessment Programme). *The 2<sup>nd</sup> UN World Water Development Report: Water, a shared responsibility*. Paris, New York and Oxford. UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) and Berghahn Books.
- \* Yu, B. 1998. *Theoretical justification of SCS method for runoff estimation*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 306-310
- \* Yuan, D. y C. Elvidge. 1998. *NALC Land Cover Change Detection Pilot Study: Washington D.C Area Experiments*. *Remote Sensing of Environment*, 66:166-178

\* Yuan, F., K. E. Zawaya, B. C. Loeffelholz y M. E. Bauer. 2005. *Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing*. *Remote Sensing of Environment*, 98: 317 – 328

\* Zhan, X. y M. L. Huang. 2004. *ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps*. *Environmental Modelling & Software*, 19 (10): 875–879