

CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA CUENCA DE SAN CRISTÓBAL DE LAS CASAS, MÉXICO

LAND USE CHANGE IN SAN CRISTÓBAL DE LAS CASAS WATERSHED, MÉXICO

M. Lourdes **Figueroa-Jáuregui**^{1*}, L. Alicia **Ibáñez-Castillo**¹, Ramón **Arteaga-Ramírez**¹,
J. Luis **Arellano-Monterrosas**², Mario **Vázquez-Peña**¹

¹Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. 56230. Montecillo, Estado de México. (mlfjauregui@hotmail.com), (libanez@correo.chapingo.mx).

²Organismo de cuenca Frontera Sur, Comisión Nacional del Agua. 29020. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. (aremonterrosas@hotmail.com).

RESUMEN

De manera similar a lo ocurrido con los bosques de otras zonas tropicales, la superficie forestal en algunas regiones de los Altos de Chiapas se ha reducido casi a la mitad desde 1970. Por ello se analizaron los cambios de uso del suelo y sus efectos sobre los procesos de degradación y los procesos hidrológicos en la cuenca endorreica de San Cristóbal de las Casas, en los Altos de Chiapas, México. Los usos de suelo de la cuenca se obtuvieron mediante la clasificación supervisada de imágenes de satélite Landsat de 1975, 1993 y 2000 y Spot de 2009. La tasa anual de erosión hídrica se calculó con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, sus siglas en inglés), y el volumen de escurrimiento medio anual por el método indirecto de precipitación-escurrimiento de la norma NOM-011-CNA-2000, para los cuatro años en estudio. En la cuenca se identificaron cinco usos: agricultura de temporal (AT), bosque de encino (BQ), bosque de pino (BP), bosque mesófilo de montaña (BMM) y zonas urbanas (ZU). No se observó una tendencia marcada de cambio de superficie en AT, pero en las unidades BQ y BMM hubo una reducción de 1975 a 1993 y 2000, mientras que las zonas urbanas mostraron una tendencia de crecimiento para los cuatro años de estudio. Los niveles de erosión hídrica fueron afectados desde 1975 al 2000 debido a la pérdida de cubierta forestal y al aumento de zonas agrícolas y urbanas en ese periodo. Los volúmenes de escurrimiento anual tendieron a aumentar: 76.85 millones m³ en 1975; 78.12 en 1993; 79.48 en 2000 y 82.0 en 2009.

Palabras clave: erosión hídrica, escurrimiento medio anual, uso del suelo.

ABSTRACT

Similar to what occurs with the forests of other tropical zones, the forest surface in some regions of the Chiapas Highlands has been reduced by nearly half since 1970. Therefore, an analysis was made of land use change and its effects on the degradation processes and the hydrological processes in the endorheic watershed of San Cristobal de las Casas, in the Chiapas Highlands, México. The land uses of the watershed were obtained through the supervised classification of Landsat satellite images of 1975, 1993 and 2000, and Spot of 2009. The annual rate of water erosion was calculated with the Universal Soil Loss Equation (USLE), and the mean annual runoff volume by the indirect method of rainfall-runoff of the norm NOM-011-CNA-2000, for the four years of study. Five uses were identified in the watershed: rainfall agriculture (RA), oak forest (OF), pine forest (PF), cloud forest (CF) and urban zones (UZ). A marked tendency of change of surface in RA was not observed, but in units of OF and CF there was a reduction from 1975 to 1993 and 2000, whereas the urban zones showed a tendency of growth for the four years of study. The water erosion levels were affected from 1975 to 2000, due to the loss of forest cover and the increase of agricultural and urban zones in this period. The volumes of annual runoff tended to increase: 76.85 million m³ in 1975; 78.12 in 1993; 79.48 in 2000 and 82.0 in 2009.

Key words: water erosion, mean annual runoff, land use.

INTRODUCTION

Land use has a great influence on the process of infiltration, distribution of water in the soil and evaporation affected by plant cover (De *et al.*, 2003). Its analysis makes it possible to understand the causes and consequences of the tendencies of the

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: julio, 2010. Aprobado: junio, 2011.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 45: 531-544. 2011.

INTRODUCCIÓN

El uso de suelo tiene gran influencia en el proceso de infiltración, distribución del agua en el suelo y evaporación afectada por la cobertura vegetal (De *et al.* 2003). Su análisis permite entender las causas y consecuencias de las tendencias de los procesos de degradación, desertificación, disminución de la biodiversidad y, en general, pérdida del capital natural y cultural (Mas *et al.*, 2009).

En México, como en muchos países tropicales, hay importantes procesos de cambio de la cobertura vegetal del suelo, especialmente deforestación para el establecimiento de zonas agrícolas y urbanización (Mas *et al.*, 2009). En la cuenca de estudio ha ocurrido este tipo de cambios debido a fenómenos naturales y económicos de escala regional o global, como incendios, huracanes de alta intensidad, migración y empobrecimiento (González-Espinosa *et al.* 2009), movilización de grupos indígenas, aumento de la población y flujo de visitantes hacia las zonas urbanas de la cuenca que demandan mayores servicios. Por tanto, los objetivos de este estudio fueron: 1) analizar el cambio de uso de suelo mediante la comparación de mapas creados con imágenes de satélite Landsat MSS de 1975, Landsat TM de 1993 y 2000, y Spot de 2009, y 2) estimar la tasa anual de erosión hídrica y el volumen medio anual de escurrimiento para los escenarios de uso de suelo en 1975, 1993, 2000 y 2009.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca de San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México, está ubicada en la Región Hidrológica 30 Grijalva-Usumacinta (SRH, 1971). Incluye parte de los municipios de San Cristóbal de las Casas, Chamula, Huixtán, Tenejapa y Zinacantán, con una superficie de 287.42 km². Es una cuenca hidrográfica naturalmente endorreica, pero debido al historial de inundaciones en la ciudad, en 1974 se construyó un túnel (aproximadamente 4.3 km) para drenar el agua de la cuenca hacia el río Grijalva (García, 2005).

Uso de suelo

Para obtener los mapas de uso de suelo se usaron imágenes de satélite: Landsat MSS de 1975, Landsat TM de 1993 y 2000,

procesos de degradación, desertificación, reducción de biodiversidad and in general, loss of natural and cultural capital (Mas *et al.*, 2009).

In México, as in many tropical countries, there are important processes of change in the plant cover of the soil, especially deforestation for the establishment of agricultural zones and urbanization (Mas *et al.*, 2009). In the watershed under study, this type of change has occurred due to natural and economic phenomena of regional or global scale, such as fires, high intensity hurricanes, migration and impoverishment (Gonzalez-Espinosa *et al.*, 2009), mobilization of indigenous groups, increment of population and flow of visitors to urban zones of the watershed that demand more services. Therefore, the objectives of the present study were as follows: 1) to analyze the change of land use by means of the comparison of maps created from Landsat MSS satellite images of 1975, Landsat TM of 1993 and 2000, and Spot of 2009, and 2) to estimate the annual water erosion rate and mean annual runoff volume for the land use scenarios in 1975, 1993, 2000 and 2009.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The watershed of San Cristobal de las Casas is located in Hydrological Region 30 Grijalva-Usumacinta (SRH, 1971). It includes part of the municipalities of San Cristobal de las Casas, Chamula, Huixtán, Tenejapa and Zinacantán, with a surface of 287.42 km². It is a naturally endorheic hydrographic watershed, but due to the history of floods in the city, in 1974 a tunnel was constructed (approximately 4.3 km) to drain the water from the watershed toward the Grijalva river (García, 2005).

Land use

To obtain the maps of land use, satellite images were used: Landsat MSS of 1975, Landsat TM of 1993 and 2000, and Spot of 2009. The Landsat images were obtained from the U.S. Geological Survey (<http://glovis.usgs.gov/>) and the Spot image was provided by the Centro de Percepción Remota y Análisis Espacial (CEPRAE) of the Universidad Autónoma Chapingo. The four images referenced to the system of coordinates UTM-15n were standardized to a pixel size of 30 m for their comparison, as they originally present resolutions of 60 in image MSS, 30 in images TM and 10 in Spot.

y Spot de 2009. Las imágenes Landsat se obtuvieron del U.S. Geological Survey (<http://glovis.usgs.gov/>) y la imagen Spot fue proporcionada por el Centro de Percepción Remota y Análisis Espacial (CEPRAE) de la Universidad Autónoma Chapingo. Las cuatro imágenes referenciadas al sistema de coordenadas UTM-15n se estandarizaron a un tamaño de pixel de 30 m para la comparación entre ellas, ya que originalmente presentan resoluciones de 60 en imagen MMS, 30 en imágenes TM y 10 en Spot.

La clasificación supervisada de las imágenes de satélite se hizo con el software Idrisi versión Andes (Eastman, 2006), con el procedimiento de máxima verosimilitud e igual probabilidad para cada firma espectral. Previamente, se obtuvieron los campos de entrenamiento y las firmas espectrales para cada uso de suelo con mapas creados por el Laboratorio de Análisis de Información Geográfica y Estadística (LAIGE) del Colegio de la Frontera Sur para 1975, 1993 y 2000 y un recorrido de campo en la cuenca, para identificar usos y creación de campos de entrenamiento para la clasificación de 2009. En la cuenca se identificaron cinco usos: 1) agricultura de temporal (AT), 2) bosque de encino (BQ), 3) bosque de pino (BP), 4) bosque mesófilo de montaña (BMM), 5) zonas urbanas (ZU).

Para analizar los cambios se utilizó el modelador de cambio de uso de suelo dentro de Idrisi (Eastman, 2006), que hace una sobreposición de dos mapas de uso, analiza las transiciones de un uso a otros en cada pixel, dando como resultado mapas de cambio entre todos los usos, o entre uno y otro uso, o las áreas de persistencia en un tipo de cobertura vegetal. Con esto se obtuvo la matriz de cambio. La tasa de cambio se calculó con la siguiente fórmula (Palacio *et al.*, 2004):

$$Td = \left[\left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \right] \times 100 \quad (1)$$

donde, Td = tasa de deforestación anual en porcentaje, S_2 = área arbolada en el año final, S_1 = área arbolada en el año inicial, n = número de años del periodo de análisis.

Tasa de erosión hídrica

El modelo utilizado para el cálculo de la erosión hídrica fue la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (EUPS) o USLE por sus siglas en inglés (Wischmeier y Smith, 1978). La EUPS es un modelo matemático diseñado para cuantificar la pérdida promedio de suelo bajo condiciones específicas. Su expresión general es la siguiente:

$$S = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2)$$

donde, A = pérdida anual de suelo ($t \text{ ha}^{-1} \text{ año}$), R = factor de erosividad de la lluvia ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$), K = factor de erodabilidad

A supervised classification was made of the satellite images by means of the software Idrisi version Andes (Eastman, 2006), with the procedure of maximum likelihood and equal probability for each spectral signature. Previously, the training fields and spectral signatures were obtained for each land use with maps created by the Laboratorio de Análisis de Información Geográfica y Estadística (LAIGE) of the Colegio de la Frontera Sur for 1975, 1993 and 2000 in a field run in the watershed, to identify uses and creation of training fields for the classification of 2009. In the watershed five uses were identified: 1) rainfall agriculture (RA), 2) oak forest (OF), 3) pine forest (PF), 4) cloud forest (CF), 5) urban zones (UZ).

To analyze the changes, the modeler of land use change within Idrisi (Eastman, 2006) was used; this modeler makes a superposition of two maps of use, analyzes the transitions from one use to others in each pixel, giving as a result maps of change among all of the uses, or between one use and another, or areas of persistence in one type of plant cover. This allowed to obtain the change matrix. The rate of change was calculated with the following formula (Palacio *et al.*, 2004):

$$Td = \left[\left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \right] \times 100 \quad (1)$$

where Td = annual deforestation rate in percentage, S_2 = treed area in the final year, S_1 = treed area in the initial year, n = number of years of the period of analysis.

Water erosion rate

The model used for the calculation of water erosion was the UNIVERSAL Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier and Smith, 1978). The USLE is a mathematical model designed to quantify the average soil loss under specific conditions. Its general expression is as follows:

$$S = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2)$$

where A = annual soil loss ($t \text{ ha}^{-1} \text{ year}$), R = erosivity factor of the rainfall ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ hr}^{-1}$), K = soil erosivity factor ($t \text{ ha hr MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$), L = length factor of the slope (dimensionless), S = factor of degree of the slope (dimensionless), C = crop management factor (dimensionless), P = factor of the mechanical practices of erosion control (dimensionless).

The factors and their multiplication were obtained with the software ArcView version 3.2 and the tool SEDEOT (Sistema de Evaluación y Diagnóstico Ecológico para el ordenamiento del Territorio) developed by González (2003), which uses as inputs

del suelo ($t\ ha\ hr\ MJ^{-1}\ mm^{-1}\ ha^{-1}$), L = factor de longitud de la pendiente (adimensional), S = factor de grado de la pendiente (adimensional); C = factor de manejo de cultivos (adimensional), P = factor de las prácticas mecánicas de control de la erosión (adimensional).

Los factores y su multiplicación se obtuvieron con el software ArcView versión 3.2 y la herramienta SEDEOT (Sistema de Evaluación y Diagnóstico Ecológico para el Ordenamiento del Territorio) desarrollada por González (2003), que usa como insumos un modelo de elevación digital a partir del cual se generan los mapas en formato raster de los factores de longitud y grado de la pendiente; y mapas de precipitación (en este caso se obtuvo mediante polígonos de Thiessen), edafología, y uso de suelo para la obtención de mapas raster de los factores R, K y C.

Al factor P se le dio valor de 1 en toda la cuenca, por carecer de prácticas de control de erosión. Para el factor R se ubicó la cuenca en el mapa de regiones de erosividad de la lluvia en México, elaborado por Figueroa (1991), para determinar la ecuación a aplicar, y le corresponde la Región 12. Para esta región se usó la ecuación modificada:

$$Y = 0.71508 (P)^{1.30751} \quad (3)$$

donde, Y = erosividad de la lluvia ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ año$), P = precipitación anual (mm).

Escurrimiento medio anual

Para determinar los volúmenes medios anuales de escurrimiento superficial se usó el método indirecto precipitación-escurrimiento establecido en la norma oficial mexicana NOM-011-CNA-2000 (Comisión Nacional del Agua, 2000) mediante la siguiente expresión:

$$Vm = P \times Ce \times A \quad (4)$$

donde, Vm = volumen medio anual de escurrimiento (m^3), P = precipitación anual de la cuenca (m), Ce = coeficiente de escurrimiento (adimensional), A = área de la cuenca (m^2).

La precipitación media anual se determinó con el análisis de registros de cuatro estaciones ubicadas en la cuenca, mediante el método de polígonos de Thiessen y con el software ArcView 3.2.

El coeficiente de escurrimiento se determinó en función de la textura y uso de suelo, identificando primero el valor del factor K (Cuadro 1), para lo cual se hizo una sobreposición de mapas de textura y uso de suelo y se obtuvieron unidades con características definidas a las que se asignó un valor K.

a digital elevation model from which the maps are generated in raster format of the factors of length and degree of the slope; and rainfall maps (in this case it was obtained by means of Thiessen polygons), soil science, and land use for obtaining raster maps of the factors R, K and C.

The P factor was given a value of 1 throughout the watershed, because of the lack of erosion control practices. For the R factor the watershed was located in the map of regions of erosivity of rainfall in Mexico, made by Figueroa (1991), to determine the equation to be applied, and it corresponds to Region 12. For this region the modified equation was used:

$$Y = 0.71508 (P)^{1.30751} \quad (3)$$

where Y = erosivity of the rainfall ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ hr^{-1}\ year$), P = annual rainfall (mm).

Cuadro 1. Valores de K en función del tipo y uso de suelo (CNA, 2000).

Table 1. Values of K as a function of type and use of soil (CNA, 2000).

Uso de suelo	Tipo de suelo		
	A	B	C
Barbecho, áreas desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos en hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal cubierto más del 75 %	0.14	0.20	0.28
Pastizal cubierto del 50 al 75 %	0.20	0.24	0.30
Pastizal cubierto menos del 50 %	0.24	0.28	0.30
Bosque cubierto más del 75 %	0.07	0.16	0.24
Bosque cubierto del 50 al 75 %	0.12	0.22	0.26
Bosque cubierto del 25 al 50 %	0.17	0.26	0.28
Bosque cubierto menos del 25 %	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30

A: suelos permeables, como arenas profundas y loess poco compactos. B: suelos medianamente permeables, como arenas de mediana profundidad, loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A, terrenos migajosos. C: suelos casi impermeables, como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable o bien arcillas. ♦ A: permeable soils, such as deep sand and non-compact loess. B: moderately permeable soils, such as medium depth sands, loess somewhat more compact than those corresponding to the A soils, grainy soils. C: almost impermeable soils, such as very thin sands or loess over an impermeable layer or clays.

Dado que en la cuenca existen diferentes tipos y uso de suelo, el valor K se calculó como el promedio ponderado de cada una de las áreas homogéneas. Una vez obtenido el valor K, el coeficiente de escurrimiento se calculó con las siguientes formulas:

Si K menor o igual que 0.15 entonces:

$$Ce = K \frac{(P - 250)}{2000} \quad (5)$$

Si K mayor que 0.15 entonces:

$$Ce = K \frac{(P - 250)}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5} \quad (6)$$

donde, Ce = coeficiente de escurrimiento (adimensional), K = factor de tipo y uso de suelo (adimensional), P = precipitación media anual de la cuenca.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámica de los cambios

Con la clasificación supervisada de imágenes de satélite se obtuvieron cuatro mapas temáticos para los años 1975, 1993, 2000 y 2009 (Figuras 1, 2 3 y 4) y fueron la base para el análisis de los cambios de uso de suelo.

El uso de suelo predominante en todas las fechas fue la agricultura de temporal (AT), seguida del bosque de encino (BQ) y en tercer lugar el bosque de pino (BP) (Figura 5). Estos dos últimos tipos de vegetación, junto con el bosque mesófilo de montaña (BMM), indican aptitud forestal principal de la cuenca; sin embargo, el impacto antropogénico se refleja en la presencia de extensas áreas de AT cercanas a las pequeñas poblaciones en toda la cuenca.

Las tasas de cambio de 1975 a 1993, positivas para BP (0.33) y ZU (3.60), indican aumento; mientras que para las coberturas AT (−0.27), BQ (−0.43) y BMM (−0.59) muestran pérdida en ese periodo. De 1993 a 2000, las unidades en aumento fueron AT (0.98), BP (0.49) y nuevamente ZU (0.50); y hubo pérdida en BQ (−0.60) y BMM (−3.46), y esta unidad tuvo la mayor tasa de pérdida en los siete años.

Las tasas de cambio de 2000 a 2009 fueron: −1.39 en AT, −2.15 en BP, 1.62 en BQ, 3.26 en BMM y 2.06 en ZU. Las áreas agrícolas disminuyeron

Mean annual runoff

To determine the mean annual volumes of surface runoff the indirect rainfall-runoff method was used, established in the official Mexican norm NOM-011-CAN-2000 (Comisión Nacional del Agua, 2000) by means of the following expression:

$$Vm = P \times Ce \times A \quad (4)$$

where Vm = mean annual volume of runoff (m^3), P = annual rainfall of the watershed (m), Ce = runoff coefficient (dimensionless), A = area of the watershed (m^2).

Mean annual rainfall was determined with the analysis of records of four stations located in the watershed, by means of the method of Thiessen polygons and with the software ArcView 3.2.

The runoff coefficient was determined as a function of the texture and use of the soil, identifying first the value of the K factor (Table 1), for which a superposition was made of maps of texture and land use and units were obtained with defined characteristics to which a value of K was assigned.

Given that in the watershed there are different types and uses of soil, the value K was calculated as the weighted average of each one of the homogeneous areas. Once the K value was obtained, the runoff coefficient was calculated with the following formulas:

If K is less than or equal to 0.15 then:

$$Ce = K \frac{(P - 250)}{2000} \quad (5)$$

If K is greater than 0.15 then:

$$Ce = K \frac{(P - 250)}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5} \quad (6)$$

where Ce = runoff coefficient (dimensionless), K = factor of soil type and use (dimensionless), P = mean annual rainfall of the watershed.

RESULTS AND DISCUSSION

Dynamic of the changes

With the supervised classification of satellite images, four thematic maps were obtained for the years 1975, 1993, 2000 and 2009 (Figures 1, 2, 3 and 4) and were the base for the analysis of the land use changes.

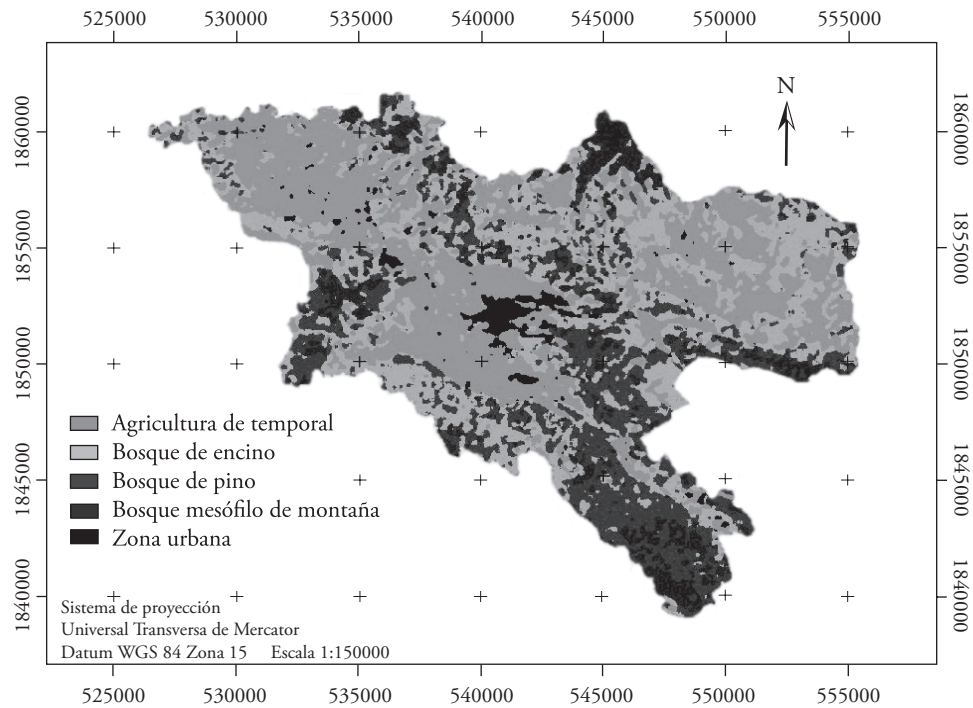


Figura 1. Mapa de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México, en 1975.
Figure 1. Map of land use in the watershed of San Cristóbal de las Casas, México, in 1975.

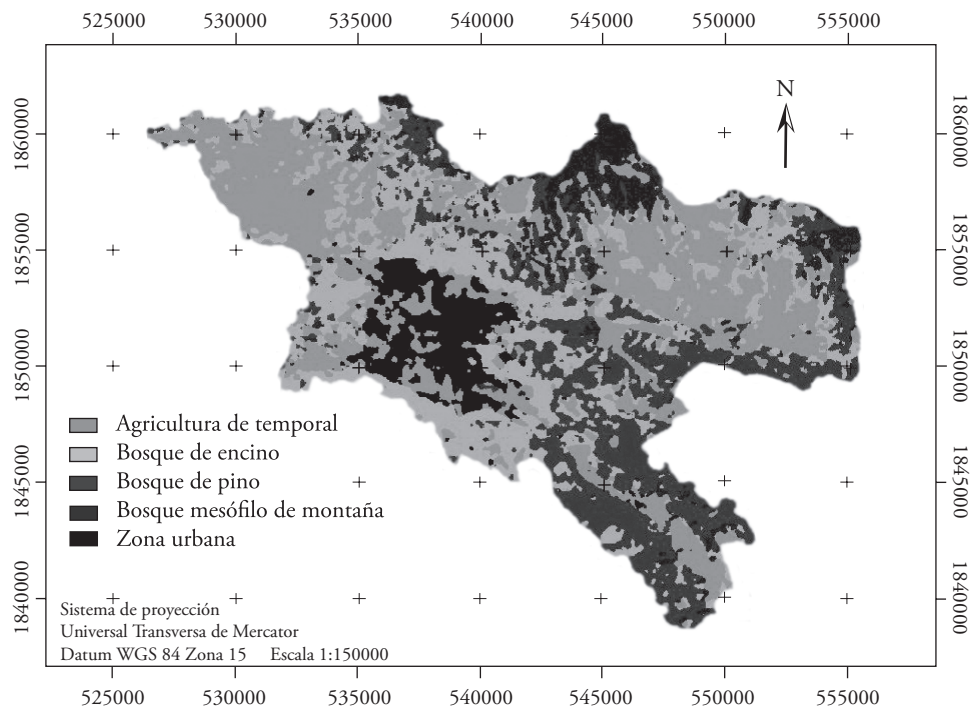


Figura 2. Mapa de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México, en 1993.
Figure 2. Map of land use in the watershed of San Cristóbal de las Casas, México, in 1993.

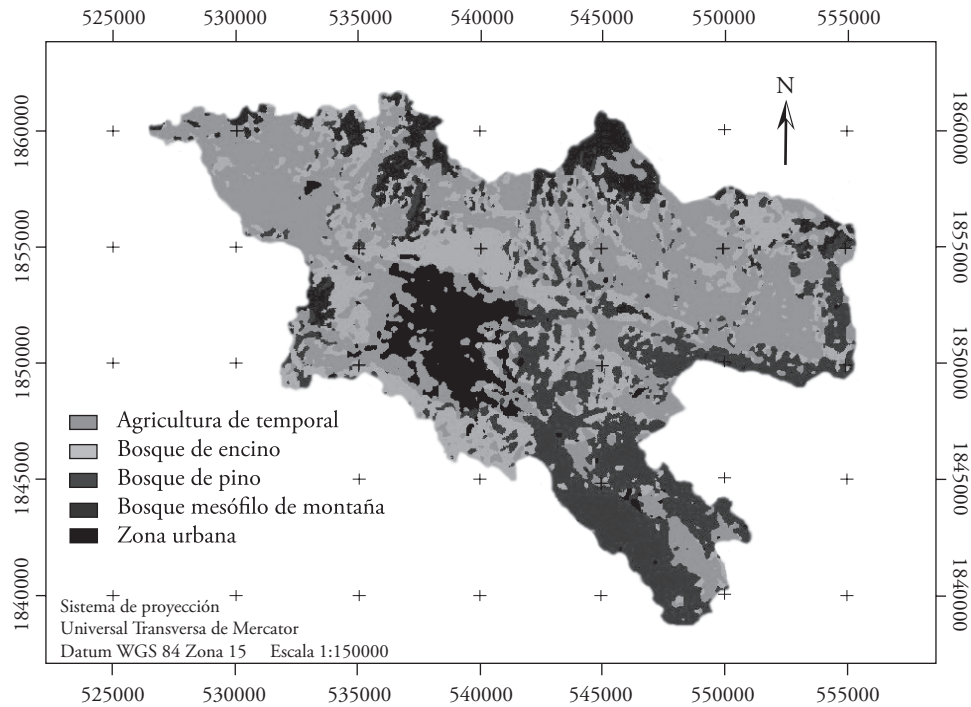


Figura 3. Mapa de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México, en 2000.

Figure 3. Map of land use in the watershed of San Cristóbal de las Casas, México, in 2000.

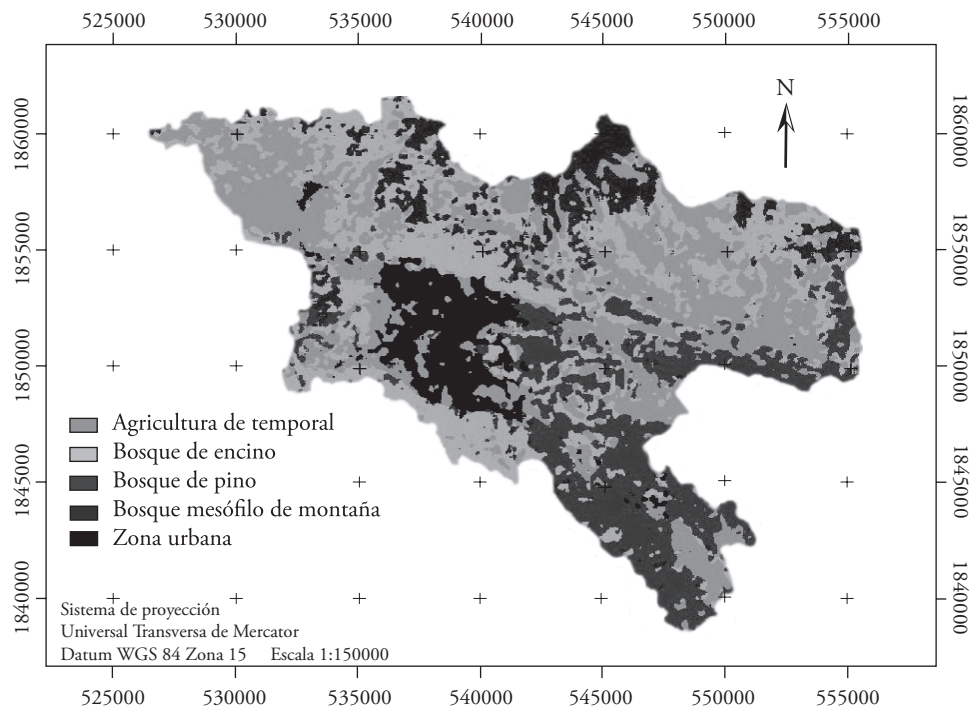


Figura 4. Mapa de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México, en 2009.

Figure 4. Map of land use in the watershed of San Cristóbal de las Casas, México, in 2009.

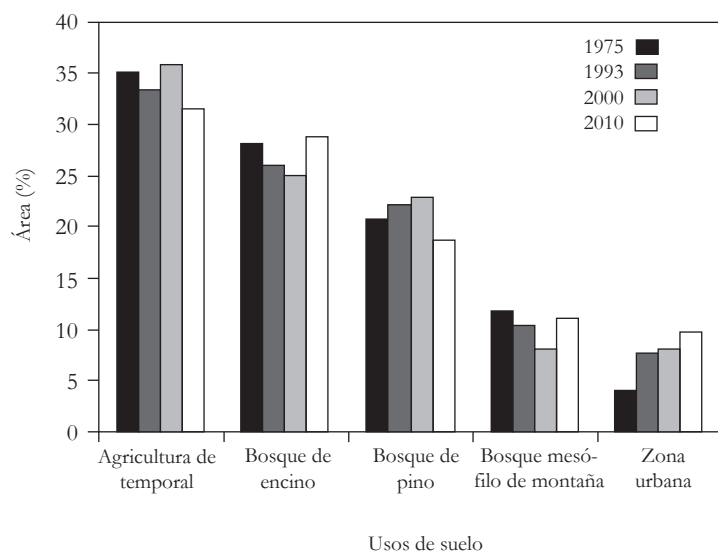


Figura 5. Porcentaje de área de la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México, según el uso del suelo para cada fecha de análisis.

Figure 5. Percentage of area of the watershed of San Cristóbal de las Casas, México, according to the land use for each date of analysis.

debido al abandono de la agricultura por las pequeñas poblaciones indígenas aledañas a la ciudad de San Cristóbal y para dedicarse a las actividades de venta de artesanías a turistas en la ciudad. Ese abandono permitió la regeneración de bosque; aunado a lo anterior, la zona urbana aumentó a más del doble en 34 años.

Las matrices de cambio de uso de suelo para los tres periodos de análisis se presentan en los Cuadros 2, 3 y 4; los valores mayores, principalmente para el periodo 1993-2000 y 2000-2010, se encuentran de forma diagonal, lo que se interpreta como mayor porcentaje de persistencia o permanencia en cada uso de suelo. Esto es similar a lo encontrado por Miranda *et al.* (2009) quienes señalan mayor persistencia en los usos de suelo que cambios en el periodo analizado.

The predominant land use in all of the dates was rainfall agriculture (RA), followed by oak forest (OF) and in third place pine forest (PF) (Figure 5). These last two types of vegetation, along with the cloud forest (CF), indicate principal forest aptitude of the watershed; however, the anthropogenic impact is reflected in the presence of extensive areas of RA near the small towns throughout the watershed.

The rates of change of 1975 to 1993, positive for PF (0.33) and UZ (3.60), indicate increase; while for the covers RA (-0.27), OF (-0.43) and CF (-0.59) there is loss in this period. From 1993 to 2000, the units in increase were RA (0.98), PF (0.49) and again UZ (0.50); and there was loss in OF (-0.60) and CF (-3.46), and this unit had the highest rate of loss in the seven years.

Cuadro 2. Matriz de cambio (%) para el periodo 1975-1993.
Table 2. Matrix of change (%) for the period 1975-1993.

		1993					
		AT	BQ	BP	BMM	ZU	Total
1975	AT	14.56	8.57	4.87	2.98	4.14	35.13
	BQ	9.63	7.77	5.92	3.17	1.66	28.15
	BP	5.24	5.53	7.06	2.19	0.78	20.81
	BMM	2.73	3.06	3.62	2.04	0.33	11.78
	ZU	1.28	1.13	0.62	0.21	0.88	4.13
Total		33.44	26.07	22.10	10.60	7.80	100.00

AT= Agricultura de temporal; BQ= Bosque de encino; BP= Bosque de pino; BMM= Bosque mesófilo de montaña; ZU= Zona urbana
♦ AT = Rainfall agriculture; BQ = Oak forest; BP = Pine forest; BMM = Cloud forest; ZU = Urban zone.

Cuadro 3. Matriz de cambio (%) para el periodo 1993-2000.
Table 3. Matrix of change (%) for the period 1993-2000.

		2000					
		AT	BQ	BP	BMM	ZU	Total
1993	AT	26.95	3.54	0.68	0.17	2.10	33.44
	BQ	3.72	11.62	7.93	2.29	0.51	26.07
	BP	1.38	5.78	11.73	2.90	0.31	22.10
	BMM	1.56	3.57	2.38	2.92	0.17	10.60
	ZU	2.19	0.48	0.13	0.00	4.99	7.80
Total		35.80	24.99	22.86	8.28	8.08	100.00

AT= Agricultura de temporal; BQ= Bosque de encino; BP= Bosque de pino; BMM= Bosque mesófilo de montaña; ZU= Zona urbana ♦ AT = Rainfall agriculture; BQ = Oak forest; BP = Pine forest; BMM = Cloud forest; ZU = Urban zone.

Cuadro 4. Matriz de cambio (%) para el periodo 2000-2009.
Table 4. Matrix of change (%) for the period 2000-2009.

		2009					
		AT	BQ	BP	BMM	ZU	Total
2000	AT	21.64	7.73	1.67	1.15	3.61	35.80
	BQ	5.49	11.57	4.28	3.10	0.55	24.99
	BP	1.94	6.17	11.05	3.38	0.31	22.86
	BMM	0.89	2.76	1.35	3.29	0.00	8.28
	ZU	1.59	0.66	0.45	0.13	5.24	8.08
Total		31.55	28.89	18.80	11.06	9.70	100.00

AT= Agricultura de temporal; BQ= Bosque de encino; BP= Bosque de pino; BMM= Bosque mesófilo de montaña; ZU= Zona urbana. ♦ AT = Rainfall agriculture; BQ = Oak forest; BP = Pine forest; BMM = Cloud forest; ZU = Urban zone.

La tasa anual de deforestación calculada fue -0.19 desde 1975 hasta 2009, la cual es menor a la de 1 a 10 % en otras zonas del país (Velázquez *et al.*, 2002).

Erosión hídrica

Las Figuras 6, 7, 8 y 9 muestran los mapas de erosión hídrica obtenidos para los años estudiados. La comparación directa de las capas permite observar que más allá de cambios generalizados, ha ocurrido un desplazamiento de las áreas con las tasas de erosión más altas. En efecto, como lo muestra la Figura 10, el porcentaje de área con diferentes grados de erosión hídrica oscila entre 20 y 30 %.

En el periodo de 1975 a 2000, la superficie de erosión ligera disminuyó y pasó a un grado de erosión moderada y alta. Pero, contrario a lo que se pudiera esperar, el porcentaje de la cuenca con un grado de

The change rates from 2000 to 2009 were: -1.39 in RA, -2.15 in PF, 1.62 in OF, 3.26 in CF and 2.06 in UZ. The agricultural areas decreased due to the abandonment of agriculture for the small indigenous settlements near the city of San Cristóbal and to adopt activities of sale of crafts to tourists in the city. This abandonment allowed the regeneration of the forest; added to the above, the urban zone increased to more than double in 34 years.

The matrices of change of land use for the three periods of analysis are shown in Tables 3 and 4; the higher values, principally for the period 1993-2000 and 2000-2010, are found in diagonal form, which is interpreted as higher percentage of persistence or permanence in each land use. This is similar to what was found by Miranda *et al.* (2009), who indicate higher persistence in the land uses than changes in the period analyzed.

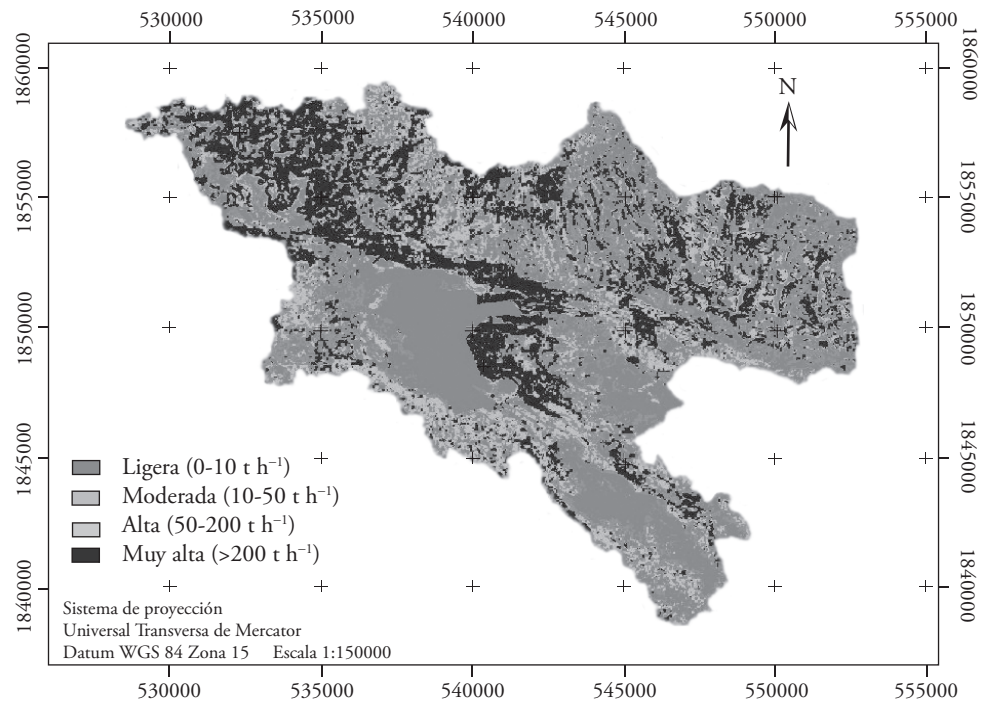


Figura 6. Mapa de erosión hídrica de la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México, en 1975.
Figure 6. Map of water erosion of the watershed of San Cristóbal de las Casas, México, in 1975.

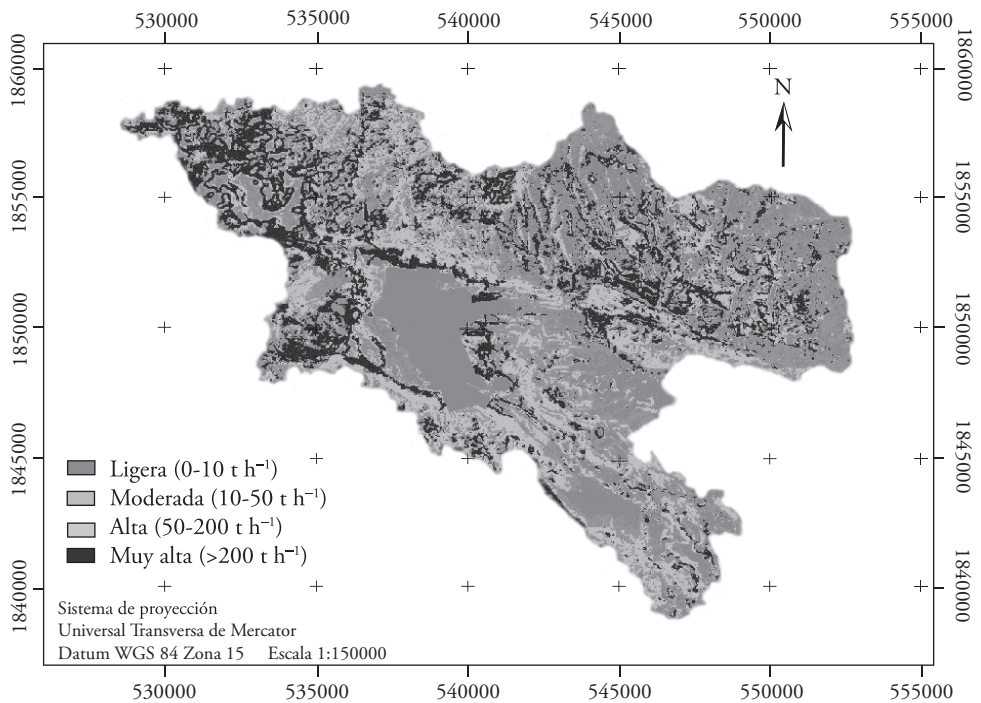


Figura 7. Mapa de erosión hídrica de la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México, en 1993.
Figure 7. Map of water erosion of the watershed of San Cristóbal de las Casas, México, in 1993.

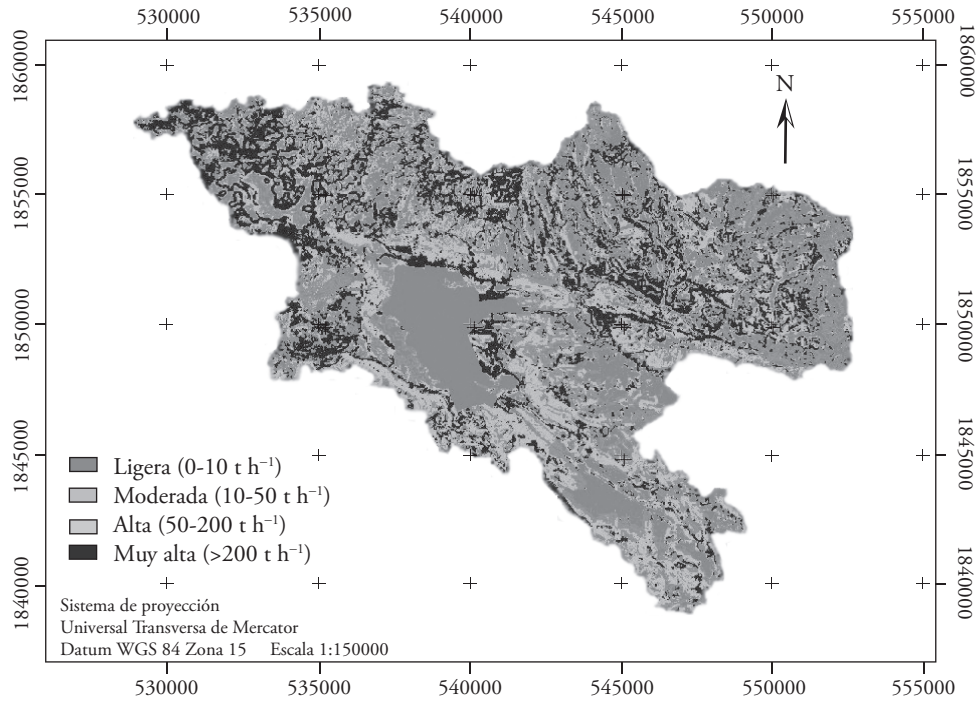


Figura 8. Mapa de erosión hídrica de la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México, en 2000.

Figure 8. Map of water erosion of the watershed of San Cristóbal de las Casas, México, in 2000.

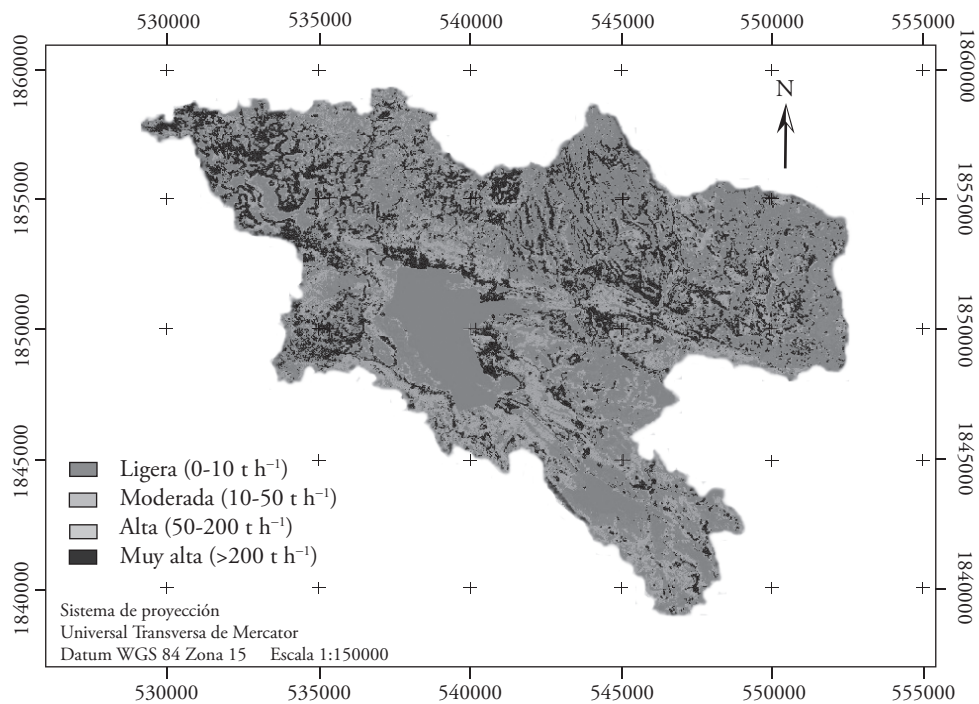


Figura 9. Mapa de erosión hídrica de la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México, en 2009.

Figure 9. Map of water erosion of the watershed of San Cristóbal de las Casas, México, in 2009.

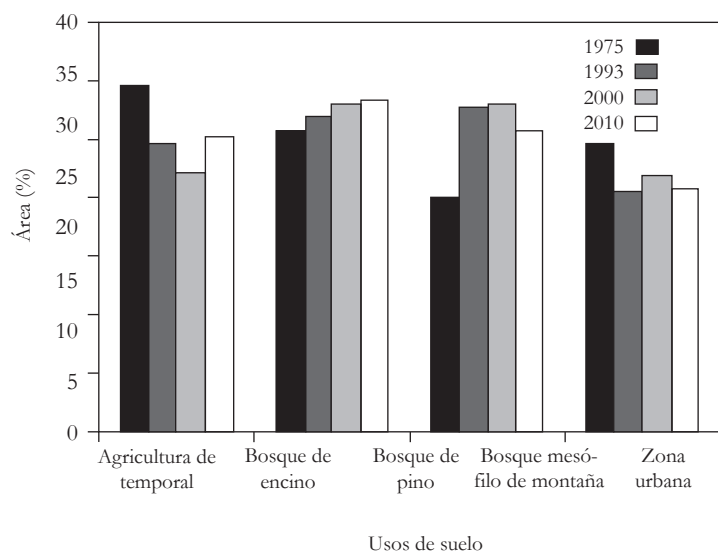


Figura 10. Porcentaje de área de la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México, con diferente grado de erosión para cada fecha de análisis.

Figure 10. Percentage of the area of the watershed of San Cristóbal de las Casas, México, with different degree of erosion for each analysis date.

erosión hídrica muy alta se mantuvo e incluso disminuyó en el 2009, como consecuencia de la reducción de la superficie agrícola y la regeneración de bosque mencionado anteriormente.

Si se toma en cuenta que la tasa máxima permisible de pérdidas de suelo es de 10 t h^{-1} , la superficie de la cuenca con degradación pasó de 70.5 a 75 % de 1975 a 2010, inferior a la media de 3 % anual en México. A diferencia de lo reportado por Cotler y Ortega (2006), el cambio de uso de suelo en la cuenca no afectó de manera considerable los valores de erosión, sino la distribución de las áreas con diferentes grados de erosión hídrica.

Escurrimiento medio anual

Las alteraciones que los humanos producen sobre la cobertura vegetal causan un aumento de los volúmenes escurridos (Choi, 2007), debido a que el coeficiente de escurrimiento está en función de la textura y el uso del suelo. Si se considera que las cubiertas arboladas representan los menores valores de K (0.16 Y 0.22 de acuerdo con el porcentaje de cobertura del suelo), la deforestación observada en la cuenca (-0.19), aunque baja, representa un cambio notable en los valores de coeficiente de escurrimiento y, en consecuencia, en los valores de escurrimiento de un año a otro (Cuadro 5).

Además, las zonas urbanas (que presentan el valor del factor K más alto con respecto a las unidades analizadas) aumentaron a más del doble de 1975 a 2009, lo que se refleja en un incremento de 6.7 % en

The annual rate of deforestation calculated was -0.19 from 1975 to 2009, which is lower than that of 1 to 10 % in other zones of the country (Velázquez *et al.*, 2002).

Water erosion

Figures 6, 7, 8 and 9 show the maps of water erosion obtained for the years studied. The direct comparison of the layers makes it possible to observe that beyond generalized changes, a displacement has occurred of the areas with highest erosion rates. In effect, as shown in Figure 10, the percentage of area with different degrees of water erosion fluctuates between 20 and 30 %.

In the period of 1975 to 2000, the surface of slight erosion decreased and passed to a degree of moderate and high erosion. However, contrary to what could be expected, the percentage of the watershed with a very high degree of water erosion was maintained and even decreased in 2009, as a result of the reduction

Cuadro 5. Volumen de escurrimiento para cada año de estudio.

Table 5. Runoff volume for each year of study.

Variable estimada	K ponderada	Coeficiente de escurrimiento	Escurrimiento (millones m^3)
1975	0.2334	0.1903	76.86
1993	0.2359	0.1935	78.12
2000	0.2386	0.1969	79.48
2009	0.2436	0.2031	82.01

el periodo analizado. Estos resultados son comparables con los de Mustafa *et al.* (2005), quienes indican que para una zona en la que las áreas forestales disminuyen 11 % y las áreas urbanas aumentan casi tres veces, el escurrimiento aumenta considerablemente.

CONCLUSIONES

En los periodos estudiados no se presentó una marcada tendencia de cambio de uso, con excepción de las zonas urbanas, las cuales aumentaron de 4.13 a 9.7 % de la superficie total de la cuenca. Los efectos del cambio de uso de suelo (urbanización) se manifestaron en los volúmenes medios anuales escurridos que aumentaron de 76.86 a 82.01 millones m³. La tasa anual de erosión hídrica fue afectada en el periodo 1975-2000, aunque más que en su valor, en la distribución de las áreas degradadas en la cuenca.

LITERATURA CITADA

- Choi, W. 2007. Estimating land-use change impacts on direct runoff and non-point source pollutant loads in the Richland Creek basin (Illinois, USA) by applying the L-THIA model. *J. Spatial Hydrol.* 7(1): 47-65.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2000. Norma Oficial mexicana NOM-011-CNA-2000: Conservación del recurso agua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- Cotler, H., and P. Ortega M. 2006. Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamela watershed, México. *Catena* 65:107-117.
- De R., A., G. Schmuck., V. Perdigo, and J. Thielen. 2003. The influence of historic land use changes and future planned land use scenarios on floods in the Oder catchment. *Physics Chem. Earth* 28: 1291-1300.
- Eastman J., R. 2006. Idrisi Andes. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Clark University. Massachusetts. USA.
- Figueroa S., A. 1991. Manual de Predicción de Pérdida de Suelo por erosión. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México, México. 150 p.
- García G., A. 2005. La cuenca hidrológica de San Cristóbal de las Casas, Chiapas: entre la gestión local y la nacional. In: Vargas, S., y E. Mollard (eds). Problemas Socio-económicos y Experiencias Organizativas en las Cuencas de México. IMTA, IRD. Cuernavaca, Morelos, México. pp: 42-141.
- González-Espinosa M., N. Ramírez-Marcial., L. Galindo-Jaimes., A. Camacho-Cruz., D. Golicher., L. Cayuela, y J. M. Rey-Benayas. 2009. Tendencias y proyecciones del uso del suelo y la diversidad florística en Los Altos de Chiapas, México. *Investigación Ambiental: Ciencia y Política Pública* 1:40-53.
- González G., R. 2003. Automatización del sistema de evaluación y diagnóstico ecológico para el ordenamiento del territorio (SEDEOT): índice de erosión hídrica. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. 89 p.
- of agricultural surface and the regeneration of forest previously mentioned.
- If it is considered that the maximum rate of soil losses permitted is 10 t h⁻¹, the surface of the watershed with degradation passed from 70.5 to 75 % from 1975 to 2010, lower than the mean of annual 3 % in México. Contrary to what was reported by Cotler and Ortega (2006), the change of land use in the watershed did not have considerable effect on the erosion values, but on the distribution of the areas with different degrees of water erosion.

Mean annual runoff

The alterations that humans produce on the plant cover cause an increase of the runoff volumes (Choi, 2007), due to the fact that the runoff coefficient is a function of the texture and use of the soil. If it is considered that the treed covers represent the lowest values of K (0.16 and 0.22 according to the percentage of soil cover), the deforestation observed in the watershed (-0.19), although low, represents a notable change in the values of runoff coefficient, and consequently, in the runoff values from one year to the next (Table 5).

Furthermore, the urban zones (which represent the highest K factor with respect to the units analyzed) more than doubled from 1975 to 2009, which is reflected in an increment of 6.7 % in the period analyzed. These results are comparable with those of Mustafa *et al.* (2005), who indicate that for a zone in which the forest areas decreased by 11 % and the urban areas tripled, the runoff increases considerably.

CONCLUSIONS

In the periods studied there was not a marked tendency of change of use, with the exception of the urban zones, which increased from 4.13 to 9.7 % of the total surface of the watershed. The effects of the change of land use (urbanization) were manifested in the mean annual runoff volumes which increased from 76.86 to 82.01 million m³. The annual rate of water erosion was affected in the period 1975-2000, although more than in its value, in the distribution of the degraded areas of the watershed.

—End of the English version—

-----*-----

- Mas J., F. A. Velázquez., y S. Couturier. 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental. Ciencia y Política Pública* 1: 23-39.
- Miranda A., L., L. A. Ibáñez C., J. R. Valdez L., y P. Hernández R. 2009. Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de periodo de retorno del río grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios de uso del suelo. *Agrociencia* 43: 333-344.
- Mustafa Y., M., M.S.M Amin, T. S. Lee, and A.R.M Shariff. 2005. Evaluation of land development impact on a tropical watershed hydrology using remote sensing and GIS. *J. Spatial Hydrol.* 5 (2):16-30.
- Palacio P., J. L., M. T. Sánchez, S. J. M. Casado, I. E. Propin, F. J. Delgado, C. A. Velázquez, M. L. Chías, B. M. I. Ortiz, A. J. González, S. G. Negrete, F. J. Gabriel M., y R. Márquez H. 2004. Indicadores para la Caracterización y Ordenamiento del Territorio. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Instituto de Geografía de la UNAM y Secretaría de Desarrollo Social. Convenio SEDESOL-Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F. 161 p.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). 1971. Boletín hidrológico 38. Tomo 1. México, D.F. 298 p.
- Velázquez A., J. F. Mas, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, P. C. Alcántara, R. Castro, T. Fernández, G. Bocco, E. Ezcurra, y J.L. Palacio. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso de suelo en México. *Gaceta Ecológica* 62: 21-37.
- Wischmeier W., H., and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agriculture Handbook* 537. United States Department of Agriculture. Washington. 58 p.