

VALUACIÓN AMBIENTAL DEL CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO: CERRO DE PATAMBAN, TANGANCÍCUARO, MICHOACÁN

Environmental valuation of land cover change:
Cerro de Patamban, Tangancícuaro, Michoacán

Ángel Martín Loza Vargas, Nezahualcóyotl Flores Lazo,
Víctor Manuel Hernández Madrigal, Verónica Leyva Picazo

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
vargas.aml@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito realizar la valuación ambiental del cambio de uso de suelo en el Cerro de Patamban, Michoacán, a través de valorar la disminución de servicios ecosistémicos, debido al cambio de cobertura del suelo. En el procedimiento se utilizó un sistema de información geográfica donde se identificaron las áreas con cambio de cobertura para 1973 y 2017, así como las formaciones vegetales modificadas. Posteriormente, con base en la literatura y sin pretender ser exhaustivos, se identificaron los servicios ecosistémicos a valorar: captura de carbono, control de erosión y captación de agua. Se establecieron con base en niveles de conservación, costos por hectárea de cada servicio y formación vegetal para relacionarlos al aumento o disminución en superficie y obtener diferencias monetarias. Se consideró el monto de ingreso potencial y costo de rehabilitación del ecosistema para finalmente determinar el importe implicado al cambio de uso del suelo. Como resultado se encontró el valor general de 97.671 millones de pesos, que está compuesto principalmente por los conceptos de captura de carbono y rehabilitación del ecosistema, aportando más de 47 millones de pesos cada uno y seguido por la captación de agua con 2.3 millones, mientras que control de erosión y pérdida de ingresos representaron menos de 0.5 millones de pesos cada uno. Con lo mencionado se concluye que es posible cuantificar en términos económicos el impacto ambiental del cambio de uso del suelo como referencia de valor para fomentar sistemas sustentables de manejo de los recursos naturales.

Palabras clave: cambio de uso del suelo, captación de agua, captura de carbono, control de erosión, servicios ecosistémicos, valoración económica.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to perform the environmental valuation of land use change in Cerro de Patamban, Michoacán, by valuing the decrease in ecosystem services due to the change in land cover. It was started by determining the areas that presented a difference in the class of coverage using available cartographic information on land use for 1973 and 2017, after which the plant formations modified on the surface at the end of the period were identified, then based on literature and under no pretention of exhaustion, the ecosystem services to be valued were identified: carbon capture, erosion control and water catchment. Costs per hectare of each mentioned service and plant formation were established to relate them to the increase or decrease of area and obtain the monetary difference, the potential amount of income and cost of the ecosystem rehabilitation were considered to finally determine the monetary amount involved in the land use change. The general value of 97.671 million pesos was found, composed mainly of the concepts of carbon capture and ecosystem rehabilitation, each contributing more than 47 million pesos, followed by water catchment with 2.3 million, while erosion control and loss of income represented less than 0.5 million pesos each. With the aforementioned, it is concluded that it is possible to quantify the environmental impact by the land use change in economic terms as a reference value to promote sustainable systems of natural resources management.

Keywords: carbon capture, economic valuation, ecosystem services, erosion control, land use change, water catchment.

INTRODUCCIÓN

Entre los diversos antecedentes acerca del cambio de cobertura del suelo, se encuentra un informe de la serie de Políticas Pecuarias



de la Dirección de Producción y Sanidad Animal del Fondo Mundial para la Agricultura y la Alimentación (FAO) que menciona que en América Latina se ha deforestado una superficie boscosa equivalente al territorio de la India, teniendo como causa principal la expansión de los pastizales para la producción ganadera, lo cual genera daños ambientales, a veces difíciles de calcular, así como la liberación de miles de millones de toneladas de bióxido de carbono a la atmósfera lo que afecta a nivel global (FAO, 2007). También la expansión de la frontera agrícola es una amenaza creciente a la biodiversidad como lo ha investigado la Dirección Nacional de Ordenamiento Ambiental y Conservación de la Biodiversidad en Argentina (2008).

Por otro lado, [21] explica que las tierras agrícolas altamente productivas y bien ubicadas tienden a desaparecer, en la medida en que el mercado urbano ofrece mejores ganancias. Lo anterior representa una opción viable para los propietarios en corto plazo, ya que la pobreza es el factor más profundo que promueve deforestación y degradación ambiental mediante el cambio de uso de suelo.

Así pues, la expansión de la agricultura, la ganadería y la zona urbana a lo largo del tiempo causan impacto en los ecosistemas mientras que los humanos obtienen beneficios de estos [2]. En cuanto a ello, los estudios de cambio de uso de suelo en escala local son escasos y no existe un sistema de monitoreo de dicho cambio, de sus causas y de su predicción [11], ni la valoración económica de los impactos. En el caso de Patamban se ha iniciado un proceso de cambio de uso de suelo en terrenos forestales, sin embargo, al sucumbir la capacidad productiva de éstos terminarán en su abandono [11].

Con los antecedentes de la problemática, también se puede notar que la importancia de los servicios ecosistémicos solamente se enlista, se categoriza o se describe, por lo que a partir de la adecuada valoración económica de los costos ambientales puede lograrse un uso eficiente de los ecosistemas

[19], ya que al considerar el valor de los servicios ecosistémicos en la toma de decisiones [17] se pueden generar políticas eficaces y bien dirigidas para desacelerar la deforestación y promover sistemas sostenibles de aprovechamiento de los recursos naturales.

Debido a que en la zona de estudio no se han realizado indagaciones sobre el tema, el presente estudio tiene el propósito de estimar el valor de los servicios ecosistémicos en el cerro de Patamban para conocer el costo implicado en la expansión de la actividad agrícola donde originalmente el suelo sostenía un ecosistema de bosque templado. Con la finalidad de que el proceso de toma de decisiones acerca del adecuado uso de suelo, desde la perspectiva sustentable, sea con una visión incluyente de costo-beneficio [15].

La presente investigación se planteó bajo la hipótesis de que la degradación ambiental puede cuantificarse económicamente con el objetivo de estimar el valor económico del impacto a los servicios ecosistémicos, generado por el cambio de uso del suelo en el Cerro de Patamban, Tangancícuaro de Arista, Michoacán de Ocampo. Cabe destacar que en este estudio se utiliza el concepto de impacto ambiental sin menoscabo del término de la teoría económica donde se denomina externalidad. Es importante mencionar a manera de alcances, que se trabajó con los importes que representan los servicios ambientales mas no con las cantidades de masa o volumen en que éstos se generan y que se abordan únicamente impactos primarios (no los culturales) y circunscritos al área de estudio (no regionales o globales). Además, este método se enfoca en las diferencias en cantidad de superficie que presenta cada tipo de cobertura en el periodo dado, mas no analiza los posibles cambios en su ubicación geográfica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El primer requerimiento de la investigación fue la delimitación del área de estudio mediante el criterio geomorfológico, considerando adicionalmente la división política mu-

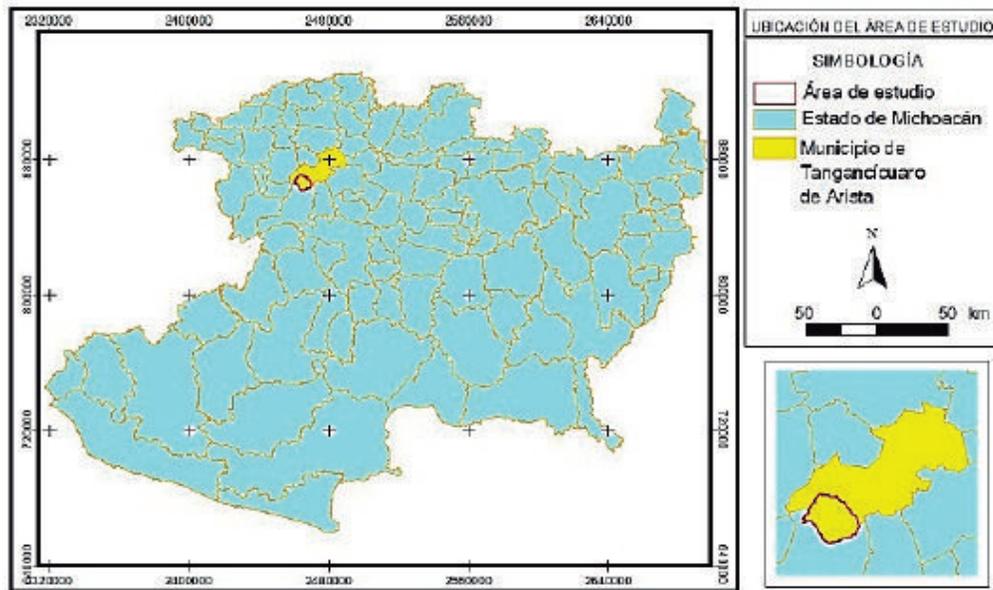


Figura 1. Ubicación del área de estudio Cerro de Patamban.
Fuente: elaboración propia a partir de [12]

nicipal de Tangancicuaro de Arista que abarca el Cerro de Patamban (Patamban), ubicado al sur de dicho municipio y perteneciente al estado de Michoacán de Ocampo como se muestra en la Figura 1. La zona representa un área de 5,897.70 ha y está caracterizada por un ecosistema de bosque templado y agricultura de temporal [13]. La localidad de Patamban constituye el principal asentamiento humano de la zona con 3,602 habitantes, dedicados principalmente a la agricultura de temporal y alfarería [11], con un crecimiento nulo de la población en los últimos 30 años.

Análisis del cambio de uso del suelo

Para abordar el trabajo se realizó un análisis cartográfico del cambio de uso del suelo que muestra la superficie que presentó modificación en el tipo de cobertura del suelo. Para ello se eligió el periodo de estudio teniendo en cuenta la información disponible, así que se tomó como fecha inicial el año 1973 y como fecha final el año 2017, y se copiaron las cartas digitales tipo vector de uso de suelo y vegetación escala 1:50 000 de la zona de trabajo. La primera carta fue tomada

de la Tesis doctoral de Flores, titulada *Valoración de bienes y servicios ecosistémicos, como indicador del ordenamiento ecológico del territorio en la cuenca del Río Duero, Michoacán* y mostrada en la Figura 2, mientras que la segunda, del Inventario Forestal Nacional (IFN) de la Comisión Nacional Forestal (2014) y United States Geological Survey (2017), representada en la Figura 3. A ambas cartas se les homogeneizó la base de datos para posteriormente realizar un cruce cartográfico, utilizando el programa ArcMap 10.3 para obtener las áreas que mostraron cambio de tipo de cobertura en dicho periodo como se aprecia en la Figura 4, al tiempo que se generó una nueva tabla de atributos (véase Tabla 14) mediante el *software*.

A partir de la Carta de cambios en el uso de suelo y vegetación (Figura 4) se recalculó la superficie de cada división en el mapa y se identificó la ruta que siguió cada cambio, creando así una matriz con los tipos de cobertura en cada fecha e incluyendo las superficies en hectáreas presentes al final del periodo como se asienta en el Tabla 14 del apartado de Resultados.

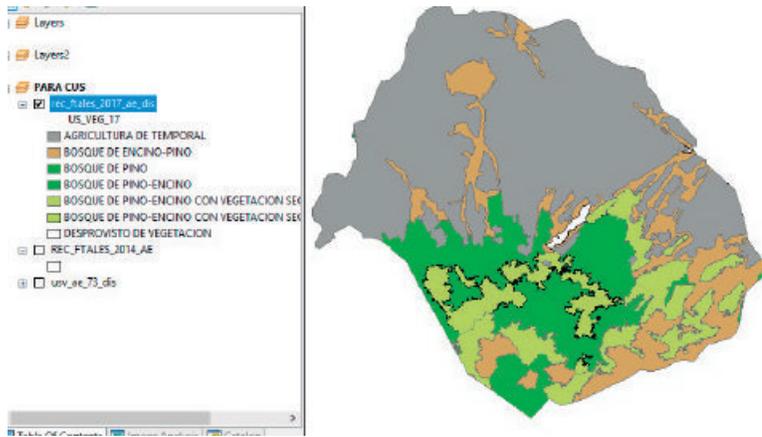


Figura 2. Vegetación y uso de suelo del área de estudio Cerro de Patamban en 1973.
Fuente: Elaborado a partir de Flores (Tesis doctoral en proceso).

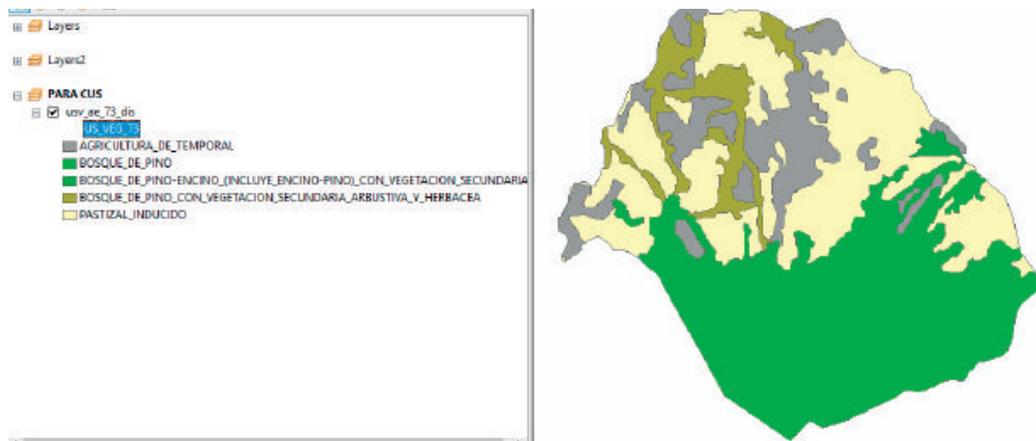


Figura 3. Carta de uso de suelo y vegetación del área de estudio Cerro de Patamban en 2017.
Fuente: Elaboración propia a partir de CONAFOR (2014) y USGS (2017).

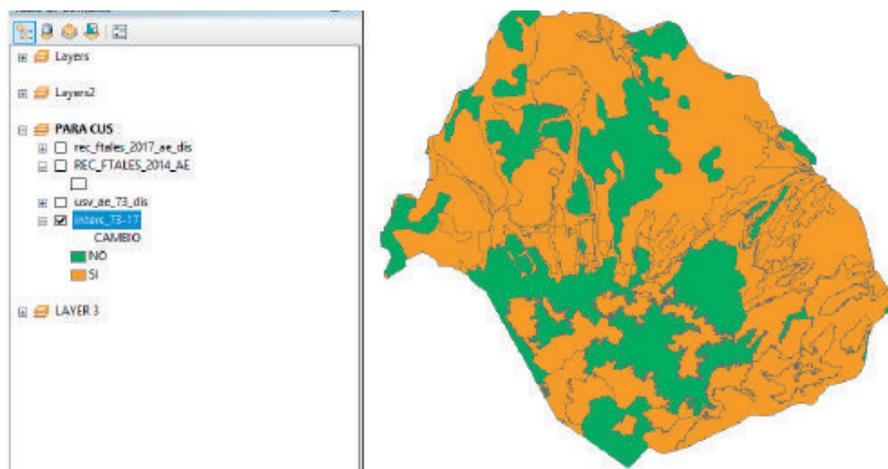


Figura 4. Carta de cambios en el uso de suelo y vegetación del área de estudio Cerro de Patamban en el periodo 1973-2017.
Fuente: Elaboración propia a partir de Flores (Tesis doctoral en proceso), CONAFOR (2014) y USGS (2017).

Valuación

Cotler *et al.* [6] menciona que los ejercicios tendientes a valorar los ecosistemas y los servicios ambientales aún son incipientes, puntuales y muchas veces insuficientes e incompletos, por lo que la perspectiva de valorar económicamente los servicios que otorgan los ecosistemas puede convertirse en una tarea titánica, e incompleta. Por ello, generalmente la valoración de un ecosistema o un componente de éste suele expresarse considerando uno o algunos de sus beneficios. Costanza *et al.* [5] muestran la importancia de clasificar el capital natural conforme a cada bioma existente y relacionar a éstos los principales servicios que proveen. De tal modo que en el presente trabajo se hizo uso de información de diversas investigaciones publicadas y no fue el objetivo realizar nuevos muestreos en campo. Así mismo durante la búsqueda de datos que sirvieran de base

para realizar la valuación del impacto a los servicios ecosistémicos por cambio de uso del suelo, se encontró en la literatura información de útil aplicación y relacionable a los diferentes tipos de cobertura del suelo para valorar los servicios ecosistémicos de Captura de carbono, Control de erosión y el servicio de Captación de agua mediante el procedimiento descrito a continuación:

Captura de carbono

Se construyó un cuadro con base en valores por hectárea de pérdida de inventario de CO₂, debidas al cambio de uso del suelo en algunos tipos de cobertura, y datos estimados a partir de Center for Social and Economic Research on the Global Environment (CSERGE) (1993) para diferentes niveles de conservación del ecosistema propuestos y mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores por hectárea de pérdida de inventario de CO₂ debido al cambio de uso del suelo (USD\$/ha) y de acuerdo con el nivel de conservación (NC) propuesto.

Tipo de bosque	NC 3	NC 2	NC 1	Diferencias en pérdida de valor
	*Sin Vegetación	Pastizal	Cultivos	
Templado caducifolio	743	693	643	50
Tropical caducifolio	1911	1887	1863	24
Templado conífero	3462	3436	3410	26
Tropical siempre verde	3929	3633	3337	296
Templado mixto	2102.5	2064.5	2026.5	38

*Datos inferidos y basados en los promedios de las diferencias en valores, considerando las coberturas en la zona. Debido a que el valor tiende a ser alto, se propuso utilizar niveles de estado de conservación y usar el rango de diferencia de valor entre cada nivel como dato conservador.
Los valores se presentan en dólares estadounidenses del año 1993.
NC 1. Nivel de conservación alto; NC 2. Nivel de conservación medio; NC3. Nivel de conservación bajo
Fuente: elaboración propia a partir de CSERGE (1993).



Tabla 2. Valores de pérdida de inventario CO₂/ha y superficie de cambio de acuerdo con el destino-procedencia de cada formación vegetal.

Fuente: Elaboración propia y CSERGE (1993).

	Cultivos		Bosques de coníferas		Bosques coníferas-latifoliadas		Área sin vegetación aparente	
	Superficie (ha)	Valor (USD/ha)	Superficie (ha)	Valor (USD/ha)	Superficie (ha)	Valor (USD/ha)	Superficie (ha)	Valor (USD/ha)
Cultivos	0	\$0.00	8.2445	\$3,410.00	19.7802	\$643.00	0.0000	\$0.00
Bosques de coníferas	177.8259	-\$3,410.00	0	\$0.00	1515.2926	-\$1,377.50	0.7503	-\$3,462.00
Bosques de coníferas-latifoliadas	298.1962	-\$2,026.50	10.0583	\$1,377.50	0	\$0.00	1.1945	-\$2,102.50
Pastizal	1725.7383	\$38.00	51.7679	\$3,436.00	103.8644	\$2,064.50	23.2866	-\$38.00

Tabla 3. Resumen de pérdida de valor (USD) debido a la disminución del inventario CO₂ en cada superficie con cambio de uso del suelo.

	Cultivos	Bosques de coníferas	Bosques coníferas-latifoliadas	Área sin vegetación aparente
Cultivos	\$0.00	\$28,113.75	\$12,718.67	\$0.00
Bosques de coníferas	-\$606,386.32	\$0.00	-\$2,087,315.56	-\$2,597.54
Bosques de coníferas-latifoliadas	-\$604,294.60	\$13,855.31	\$0.00	-\$2,511.44
Pastizal	\$65,578.06	\$177,874.50	\$214,428.05	-\$884.89
Total	-\$2,791,422.01	-\$1,145,102.86	\$219,843.56	-\$5,993.87

Los valores se presentan en dólares estadounidenses del año 1993.
Fuente: elaboración propia con datos de CSERGE (1993).

Tabla 4. Pérdida de valor debido a la disminución del inventario CO₂ en cada superficie con cambio de uso del suelo, en pesos reales con base en 2010.

Año	Pesos por dólar	*Precios corrientes	INPC 1993 base segunda quincena 2010	**Pesos reales con base en 2010
1993	\$3.12	-\$8,695,708.82	\$18.43	-\$47,190,040.83

*Precios corrientes=(tipo de cambio pesos por dólar multiplicado por valor obtenido en USD en 1993)
**Valor real=(Valor nominal/Deflactor "inflación que es el INPC") x 100.
Fuente: Elaboración propia.

Los valores de la Tabla 1 se multiplican por las superficies de cambio de cada formación vegetal (véase Tabla 2) para obtener los valores del impacto ambiental, debido a la pérdida de la capacidad del ecosistema para captura de carbono (Tabla 3):

El valor total de -\$2,791,422.01 se trasladó de dólares a pesos mexicanos, además se convirtió el valor nominal a valor real (Tabla 4) realizando el ajuste por inflación con el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) mediante:

$$\text{Valor real} = (\text{Valor nominal} / \text{Deflactor "inflación INPC"}) \times 100.$$

Control de erosión

Se generó un cuadro de valores con niveles de conservación del ecosistema propuestos por tipo de cobertura o formación vegetal (véase Tabla 5), el cual consideró los costos por pérdidas en la productividad y costos por la reposición de nutrientes del suelo por hectárea causados por la erosión, usando como límites

inferior y superior los escenarios conservadores para el Nivel de conservación alto y crítico, y para el Nivel de conservación bajo. Estos fueron tomados de Cotler *et al.* [6] quienes recopilaron estudios sobre la erosión de suelos en México desde 1960 a 2006, que refieren datos de 140 sitios a lo largo del país donde se consideran como variables principales y como causantes de erosión al clima, tipo de suelo, uso de suelo y pendiente. Se utiliza el factor C que representa el coeficiente por tipo de cobertura de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por sus siglas en inglés) para obtener los valores de Niveles de conservación 2 y 3 como se observa a continuación.

Los montos de la Tabla anterior son la base para obtener el valor del impacto ambiental debido a la pérdida de la capacidad del ecosistema para controlar la erosión, por lo que se generó la Tabla 6, donde se usa la diferencia de valores del tipo de cobertura de destino y el tipo de cobertura de procedencia, por ejemplo, \$ -12.11 USD/ha representa merma de valor al cambiar el uso de suelo Bosques al uso de suelo Cultivos.

Tabla 5. Valores de acuerdo con niveles de conservación por tipo de cobertura

Niveles de conservación (NC)	Cobertura	Valor (USD/ha)	Factor C
4	Sin vegetación	\$54.50**	1.00
3	Cultivos*	\$50.41*	0.75
2	Pastizal*	\$38.46*	0.02
1	Bosques	\$38.30***	0.01

* Valores obtenidos en base a la ecuación generada en hoja de cálculo Excel $Y=16.364x + 38.136$; $R^2=1$, donde X corresponde al factor C respectivo.

** Valor de costo total de pérdida por erosión de escenario crítico obtenido por Cotler *et al.* [6].

*** Valor de costo total de pérdida por erosión de escenario conservador obtenido por Cotler *et al.* [6].

Todos los valores se presentan en dólares estadounidenses del año 2011 como se encuentran en la fuente de consulta.

NC1. Nivel de conservación alto; NC2. Nivel de conservación medio-alto; NC3. Nivel de conservación medio-bajo; NC4. Nivel de conservación bajo

Fuente: Elaboración propia con datos de Cotler *et al.* [6] y Montes-León *et al.* [18].



Con base en la Tabla 6, el valor de pérdida de suelo se multiplicó por la superficie de cada formación vegetal para obtener el valor total de la matriz que refleja el impacto económico de la pérdida de suelo debido a la erosión (véase Tabla 7).

Para contar con valores comparables, se requirió trasladar el valor en dólares a pesos mexicanos y convertir el valor nominal a valor real realizando el ajuste por inflación (véase Tabla 8) con el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) mediante: Valor real=(Valor nominal / Deflactor "inflación INPC") x 100.

Captación de agua

Para conocer el valor de captura de agua y la proporción en que éste se ve afectado respecto a cada nivel de conservación del ecosistema propuesto por formación vegetal en el área de estudio se generó la Tabla 9, donde la determinación de la captura de agua se realizó a través de las variables usadas en la ecuación de escurrimiento medio (Soil Conservation Service, 1972), que considera el potencial máximo de retención de agua (S) mediante coeficientes de curvas numéricas (CN)

Tabla 6. Valores de pérdida de suelo por hectárea (USD/ha) y superficie de cambio (ha) de acuerdo con la matriz destino-procedencia por formación vegetal.

Fuente: Elaboración propia con datos de Cotler *et al.* [6] y Montes-León *et al.* [18].

	Cultivos		Bosques		Sin vegetación	
	Superficie (ha)	Diferencia en (USD/ha)	Superficie (ha)	Diferencia en (USD/ha)	Superficie (ha)	Diferencia en (USD/ha)
Cultivos	795.6104	\$0.00	28.0247	\$12.11	0.0000	\$0.00
Bosques	476.0221	-\$12.11	2691.4456	\$0.00	1.9448	-\$16.20
Pastizal	1725.7383	-\$11.95	155.6323	\$0.16	23.2866	-\$16.04

Tabla 7. Resumen de pérdida de valor (USD) debido a la erosión en cada superficie con cambio de uso del suelo.

Fuente: Elaboración propia con datos de Cotler *et al.* [6] y Montes-León *et al.* [18].

	Cultivos	Bosques	Sin vegetación
Cultivos	\$ ----	\$ 339.35	\$ ----
Bosques	-\$ 5,764.15	\$ -----	-\$ 31.51
Pastizal	-\$ 20,615.19	\$ 25.41	-\$ 373.44
Total	-\$ 26,419.52	\$ 364.76	-\$ 404.95

Los valores se presentan en dólares estadounidenses del año 2011.

Tabla 8. Pérdida de valor debido a la erosión en cada superficie con cambio de uso del suelo, en pesos reales con base en 2010.

Año	Pesos por dólar	*Precios corrientes	INPC 2011 base segunda quincena 2010	**Pesos reales con base en 2010
2011	\$12.43	-\$328,396.25	\$103.55	-\$317,134.79

*Precios corrientes=(tipo de cambio pesos por dólar multiplicado por valor obtenido en USD en 2011)
 **Valor real=(Valor nominal / Deflactor "inflación que es el INPC") x 100
 Fuente: Elaboración propia.

según el uso del suelo (véanse Ecuación 1 y Figura 5). También se usaron precios locales, oficiales y actuales por aprovechamiento de agua como se muestra en la Tabla 9.

Cuando cambia el tipo de formación vegetal que cubre a cierta superficie de suelo también se altera su capacidad para la captación de agua y por tanto el valor económico que representa. Así pues, la diferencia de valor de captura de agua entre las formaciones vegetales se incluyó en la matriz desti-

no-procedencia de acuerdo con cada cambio de uso del suelo correspondiente como se observa en la Tabla 10.

A partir de la Tabla anterior, el valor de captura de agua en pesos por hectárea se relacionó con la superficie de cada formación vegetal según la ruta de cambios, dando como resultado el valor total del impacto ambiental debido a la pérdida de potencial de captura de agua, como se observa (véase Tabla 11).

Tabla 9. Obtención de valor de captura de agua (\$/ha/año) por nivel de conservación.

Nivel conservación	Formación vegetal	CN	S	Factor de potencial máx. de retención S	Captura de agua (m ³ /ha/año)	Precio *** (\$/m ³)	Valor de captura (\$/ha/año)
1	Bosque	60	169.33	1.0000	*162.00	\$17.83	\$2,889.14
2	Pastizal	69	114.12	**0.6733	109.07	\$17.83	\$1,945.21
3	Cultivo	81	59.58	**0.3515	56.95	\$17.83	\$1,015.60
4	Sin vegetación	82	55.76	**0.3290	53.29	\$17.83	\$950.41

Consideran el volumen de agua 162 m³/ha al año captado por bosques en el estado de Michoacán según Torres-Rojo (2002).

** Obtenido en base a la ecuación de regresión lineal simple generada en hoja de cálculo Excel $Y=0.0059X$; $R^2=1$

***Considera el promedio de precios por m³ de agua de fuentes superficiales y subterráneas para el año 2017 publicado en el D.O.F (2016).

Los valores se expresan en pesos mexicanos del año 2017.

Fuente: elaboración propia a partir de datos extraídos de Soil Conservation Service (1972), Torres-Rojo (2002), D.O.F (2016) y D.O.F (2017).

(Ecuación 01)

$$Q = \frac{(P - 0.25)^2}{(P + 0.85)}$$

Donde:

Q = escurrimiento medio por evento (mm).

P = precipitación efectiva por evento (mm).

S = retención máxima potencial (mm).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

CN

CN

drenaje

Donde:

S = Potencial máximo de retención (mm).

CN = Curvas numéricas (adimensional).

Grupo hidrológico de suelos
Condición hidrológica del área de
Humedad antecedente
Uso de suelo

Figura 5. Variables relacionadas con el escurrimiento medio incluyendo el uso de suelo expresado en el coeficiente de CN. Fuente: Elaborado a partir de Soil Conservation Service (1972).



Pérdida de ingresos

La disminución de la capacidad de los ecosistemas para la provisión de servicios ambientales también puede reflejar una pérdida potencial de ingresos. En referencia al mercado nacional de servicios provenientes de los ecosistemas, la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) cuenta con el componente de pago por servicios ambientales (PSA) del Programa Nacional Forestal, mediante el cual se otorga un pago anual por hectárea a los propietarios de terrenos forestales en buen

estado de conservación. El cálculo de valor por pérdida de ingresos en este apartado se realizó bajo la premisa de que la superficie forestal perdida para el final del periodo de estudio dejaría de percibir el ingreso equivalente por el concepto mencionado, como se plasma en la Tabla 12.

El valor de pérdida de ingreso de pago por servicios ambientales se obtiene de multiplicar \$280 por la superficie de bosque por 5 años, menos \$82,500 por costo de asistencia técnica de acuerdo con el esquema del programa nacional forestal que se trata.

Tabla 10. Valores de pérdida de potencial de captura de agua por hectárea (\$/ha) y superficie de cambio (ha) de acuerdo con la matriz destino-procedencia por formación vegetal.

	Cultivos		Bosques		Sin vegetación	
	Superficie (ha)	Diferencia (\$/ha)	Superficie (ha)	Diferencia (\$/ha)	Superficie (ha)	Diferencia (\$/ha)
Cultivos	795.6104	\$0.00	28.0247	\$1,873.54	0.0000	\$0.00
Bosques	476.0221	-\$1,873.54	2691.4456	\$0.00	1.9448	-\$1,938.73
Pastizal	1725.7383	-\$929.61	155.6323	\$943.93	23.2866	-\$994.80

Fuente: Elaboración propia a partir de Torres-Rojo (2002), D.O.F (2016) y D.O.F (2017).
A partir de la Tabla anterior, el valor de captura de agua en pesos por hectárea se relacionó con la superficie de cada formación vegetal según la ruta de cambios resultando el valor total del impacto ambiental debido a la pérdida de potencial de captura de agua, como se observa abajo (véase Tabla 11).

Tabla 11. Resumen de pérdida de valor debido a la pérdida de potencial de captura de agua en cada superficie con cambio de uso del suelo. Fuente: elaboración propia.

	Cultivos	Bosques	Sin vegetación
Cultivos	\$ ----	\$ 52,505.39	\$ ---
Bosques	-\$ 891,846.34	\$ ----	-\$ 3,770.43
Pastizal	-\$ 1,604,266.26	\$ 146,905.72	-\$ 23,165.46
Total	-\$ 2,323,637.38	\$ 199,411.11	-\$ 26,935.89

Los valores se presentan en pesos mexicanos del año 2017.

Tabla 12. Pérdida del ingreso de pago por servicios ambientales.

Disminución de superficie del bosque	Monto de pago (\$/ha/año) durante 5 años	Pérdida de ingreso de PSA*
-294.3098	280	-\$494,533.72

*Considerando \$16,500 de asistencia técnica por año. Los montos se expresan en pesos mexicanos al año 2017.
Fuente: Elaboración propia con base en datos del D.O.F. (2016b).

Costos de rehabilitación del ecosistema

Se estimó el costo de rehabilitación del ecosistema para recuperar la formación vegetal de bosque y su capacidad de provisión de los servicios ecosistémicos. En el desarrollo de este apartado se utilizaron los precios base del Programa Nacional Forestal de la CONAFOR para obras y actividades de restauración aplicables a la zona de estudio, quedando como lo muestra la Tabla 13.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cambio en el uso del suelo

A partir del análisis del cambio de uso del suelo mediante cartografía temática digital se obtuvo la Matriz de ruta de cambios o Matriz destino-procedencia, que indica de cuáles coberturas proviene la cobertura actual (véase Tabla 14) y muestra que 795.61 ha de Agricultura de temporal (TA) no sufrieron cambio

Tabla 13. Pérdida del ingreso de pago por servicios ambientales.

Superficie a rehabilitar (ha)	Inversión (\$/ha)	Costo total por rehabilitación (\$)
3022.6020	\$15,664.00	\$47,346,037.73
<p>* La superficie a rehabilitar se tomó de la Carta de uso de suelo y vegetación 2017, elaborada en la Etapa 1 de la metodología. Los valores presentados se expresan en pesos mexicanos al año 2017. Fuente: Elaboración propia con base en datos del D.O.F. (2016b). Fuente: Elaboración propia con base en datos del D.O.F. (2016b).</p>		

Tabla 14. Matriz Destino-Procedencia.

Fuente: elaboración propia a partir de CONAFOR (2014) y USGS (2017).

Procedencia/ Destino	TA	BP	BQP	BPQ/VSA	BPQ/VSa	BPQ	DV
TA	795.6104	8.2445	17.1520	2.6282	0.0000	0.0000	0.0000
BP	177.8259	980.6093	638.4300	560.3290	316.5336	0.0000	0.7503
BP/VSa	268.1466	10.0583	176.5968	0.0000	0.0000	0.5953	0.0000
PI	1725.7383	51.7679	102.8143	0.2237	0.8264	0.0000	23.2866
BPQ/VSa	30.0496	0.0000	8.2933	0.0000	0.0000	0.0000	1.1945
Agricultura de temporal			TA			Pastizal inducido	PI
Bosque de pino			BP			Bosque de pino-encino	BPQ
Bosque de pino con vegetación secundaria			BP/VSa			Bosque de encino-pino	BQP
Bosque de pino-encino con vegetación secundaria arbustiva			BPQ/VSa			Desprovisto de vegetación	DV
Bosque de pino-encino con vegetación secundaria arbórea			BPQ/VSA				



y que 980.60 ha de Bosque de pino (BP) también mantuvieron el mismo uso al inicio y final del periodo de análisis, mientras que el resto de la superficie (4,121.48 ha) sí presentó algún cambio en el tipo de cobertura.

Un cambio drástico se presentó en Pastizal, dado que de conformar 1,904.65 ha iniciales se transformaron en 1,725.73 ha de Agricultura de temporal y 23.28 ha quedaron Desprovistas de vegetación (Tabla 14). Por otro lado, 155.63 ha volvieron a la cobertura de Bosque, lo cual indica revegetación del ecosistema y es un impacto positivo para la provisión de servicios ecosistémicos.

A partir de la tabla anterior se generó la matriz jerarquizada por formación vegetal (véase Tabla 15) para establecer diferencias de valor y trabajar con la información disponible. Dicha matriz muestra los tipos de vegetación y usos de suelo reagrupados como lo señala la Tabla 15.

Es importante mencionar que para la elaboración de la Tabla 15 se requirió agrupar las clases de cobertura por formación vegetal de acuerdo con el sistema clasificatorio jerár-

quico usado en la cartografía del Inventario Forestal Nacional 2000-2001 [20], debido a que la información existente en literatura no se encuentra detallada a nivel de subcomunidad vegetal, comunidad vegetal, ni tipo de vegetación. Cabe destacar que este método se enfoca en las diferencias en cantidad de superficie que presenta cada tipo de cobertura en el periodo dado, mas no analiza los posibles cambios en ubicación geográfica de cada una, lo cual puede ser planteado como objetivo para estudiarse en otra investigación.

Valor del impacto del cambio de uso del suelo a los servicios ecosistémicos

Se obtuvo el valor del impacto a cada servicio ecosistémico elegido causado por el cambio de uso de suelo. Para obtener el valor total se consideraron los costos implicados por el impacto como son Pérdida de ingreso y Costo por rehabilitación del ecosistema para recuperar su capacidad de generar servicios. Cabe mencionar que en la investigación se trabajó con los importes que representan los

Tabla 16. Valores del impacto a servicios ecosistémicos por cambio de uso del suelo.
Fuente: Elaboración propia.

Servicio ambiental	Valor del impacto
Captura de carbono	\$ 47,190,040.83
Captación de agua	\$ 2,323,637.38
Control erosión	\$ 317,134.79
Otros costos implicados	
Rehabilitación del ecosistema	\$ 47,346,037.73
Pérdida de ingreso	\$ 494,533.72
Total	\$ 97,671,384.45

Tabla 15. Matriz Destino-Procedencia sintetizada por formación vegetal.
Fuente: Elaboración basada en clasificación de [20].

Procedencia/ Destino	Cultivos	Bosques	Otros tipos de vegetación
Cultivos	795.6104	28.0247	0.0000
Bosques	476.0221	2691.4456	1.9448
Pastizal	1725.7383	155.6323	23.2866

servicios ambientales mas no con las cantidades de masa o volumen en que estos se producen. La Tabla 16 resume los resultados obtenidos.

Según la tabla anterior el valor más alto obtenido fue del impacto al servicio ecosistémico de captura de carbono, el valor más bajo determinado fue el de control de erosión y el valor intermedio, sin embargo, muy bajo en comparación con el de captura de CO² fue de captación de agua.

El valor relativamente elevado de la captura de carbono se debe al gran volumen en toneladas de carbono por hectárea que el bosque puede almacenar y así mismo perder mediante deforestación. En contraparte, el precio promedio por aprovechamiento de cada metro cúbico de agua en México 17.83 pesos (menos de 1 dólar), por lo que el valor del impacto a la captación de agua es bajo.

El concepto Pérdida de ingreso es el más bajo, semejante al valor de control de erosión, debido principalmente a que este concepto únicamente aplica en la superficie disminuida de bosque (294.30 ha), pues así aplica en México el mecanismo de pago por servicios ambientales. En contraste, el costo por concepto de rehabilitación del ecosistema es el valor más alto de todos, debido a que representa un monto alto por hectárea (\$15,664.00 pesos) y a la gran superficie a rehabilitar de 3,022.60 ha de las 5,897.70 ha que conforman el área de estudio.

De acuerdo con el alcance del presente trabajo, se evalúan solamente los impactos primarios y circunscritos al área de estudio, es decir, no se consideran por ejemplo los impactos culturales ni las afectaciones regionales o globales que puedan ocurrir.

La principal aportación de este estudio es que la valoración se realizó en referencia a un fenómeno y a un estado inicial y final del ecosistema como lo representa el cambio de uso del suelo: espacial y temporal, ya que diversos estudios presentan el valor de servicios ecosistémicos de un sitio sin línea base u otra referencia. Además, se trabajó

con distintos tipos de cobertura del suelo en la misma área de estudio, lo cual es escaso de encontrar, pues la mayoría de los estudios se enfocan en un solo tipo.

CONCLUSIONES

Este estudio permite conocer el valor general del impacto ambiental, debido al cambio de uso del suelo que es cercano a los 100 millones de pesos para el periodo evaluado de 44 años en una superficie cercana a 6,000 hectáreas, es decir, cada año se perdieron 2.21 millones de pesos en promedio. El servicio de mayor influencia en la pérdida es la captura de carbono donde la cobertura cambió de un bosque a otra. En referencia a la hipótesis, se determinó que la degradación ambiental provocada por el cambio de uso del suelo en el ecosistema del Cerro de Patamban en Tangancícuaro de Arista, Michoacán de Ocampo, sí puede ser cuantificada económicamente para contar con una referencia local de valor, útil en la toma de decisiones en el estrato social y gubernamental para fomentar sistemas sustentables de manejo de los recursos naturales.

AGRADECIMIENTOS

Al Conacyt, al convenio de investigación de la Maestría en Valuación de Bienes entre la Universidad Autónoma de Querétaro y el Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

REFERENCIAS

[1] ACUERDO por el que se dan a conocer las zonas de disponibilidad que corresponden a las cuencas y acuíferos del país para el ejercicio fiscal 2017, en términos del último párrafo del artículo 231 de la Ley Federal de Derechos vigente. Diario Oficial de la Fede-



ración. 24 de marzo del 2017. [Online]. Disponible: <http://www.dof.gob.mx/index.php?year=2017&month=03&day=24>

[2] P. Balvanera, y H. Cotler, Acercamiento al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta ecológica número especial 84-85*, pp. 8-15, 2007.

[3] BANXICO. Serie histórica diaria del tipo de cambio peso-dólar, "Tipo de cambio peso dólar desde 1954". [En línea]. Disponible en <http://www.banxico.org.mx/SielInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?accion=consultarCuadro&idCuadro=CF373#>

[4] CONAFOR. (2014). Inventario Estatal Forestal y de Suelos de Michoacán 2014. México: SEMARNAT-CONAFOR.

[5] R. Costanza, R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K Limburg, S. Naeem, R. O'Neill, J. Paruelo, R. Raskin, P. Sutton y M. van den Belt, *The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital*. *Nature*, vol. 387, no. 15, pp. 253-260.

[6] H. Cotler, C. A. López y S. Martínez-Trinidad *¿Cuánto nos cuesta la erosión de suelos? Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos agrícolas en México*. *Investigación Ambiental*, vol. 3, no. 2, pp. 31-43, 2011.

[7] CSERGE. Annexes 3-6. Economic value of carbon sequestration, watershed protection, value of pharmaceuticals from Mexico's forests, existence value; Draft report to World Bank Latin America and the Caribbean-Country Department II. Mexico Forestry and Conservation Sector Review. Substudy of economic valuation of forests. Center for Social and Economic Research on the Global Environment, 1993.

[8] Dirección de Producción y Sanidad Animal FAO. *Ganadería y deforestación. Políticas Pecuarias 03. América Latina*, pp. 1-7, 2007.

[9] Dirección Nacional de Ordenamiento Ambiental y Conservación de la Biodiversidad. El avance de la frontera agropecuaria y sus consecuencias. Publicación de la Jefatura de Gabinete de Ministros. Argentina, 2008.

[10] Flores, N. *Valoración de bienes y servicios ecosistémicos, como indicador del ordenamiento ecológico del territorio en la cuenca del Río Duero, Michoacán*. Tesis doctoral en proceso. Documento sin publicar.

[11] Galicia, L. y García-Romero, A. Degradación de los recursos forestales en México. Academia Mexicana de las Ciencias. México, pp. 1-13, 2015.

[11] INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, 2010.

[12] INEGI. Compendio de información municipal de los Estados Unidos Mexicanos 2010, Tangancicuaro, Michoacán de Ocampo. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, 2010b.

[13] INEGI. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación escala 1:250 000, serie V (capa unión), escala: 1:250000. 2ª ed. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, 2013.

[14] INEGI. (2017). Precios e inflación > Índice nacional de precios al consumidor > Mensual > Índice > Índice general y por objeto del gasto Índice general a/ (Base segunda quincena de diciembre 2010=100) [En línea]. Available: <http://www.inegi.gob.mx/>

[15] Lambert, A. *Valoración económica de los humedales: un componente importante de las estrategias de gestión de los humedales a nivel de cuencas fluviales*. Publicación Oficina Ramsar. Irán, pp. 1- 11, 2003.

[16] Ley Federal de Derechos 2017. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación, diciembre del 2016. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105138/Ley_Federal_de_Derechos.pdf

[17] Mendoza-González, G. *Land use change and effects on the value of ecosystem services along the coast of the gulf of Mexico*. *Ecological economics*, no. 82, pp.23-32, 2010.

[18] Montes- León, M. A., Uribe-Alcántara, E. M. y García- Celis, E. *Mapa nacional de*

erosión potencial. Tecnología y Ciencias del Agua. Ingeniería hidráulica en México, vol. 2, no. 1, pp. 5-17, 2011.

[19] Osorio, J.D. y Correa, F. *Valoración económica de costos ambientales: marco conceptual y métodos de estimación. Semestre económico*, vol. 7, no. 13, pp. 160-193, 2004.

[20] Palacio, J.L., Bocco, G., Velázquez, A., Mas, J., Takaki-Takaki, F., Victoria, A., Luna-González, L. y Gómez-Rodríguez, G. *La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, no. 43, pp. 183-203, 2000.

[21] Palacio, V. *Tierras agrícolas de alta productividad frente al mercado de tierras urbano. Laberinto*, no. 10, México, pp. 1-12, 2002.

[22] Reglas de operación del Programa Nacional Forestal 2017. Decimocuarta sección. Comisión Nacional Forestal. Diario Oficial de la Federación, diciembre de 2016b. [Online]. Available: http://www.conafor.gob.mx/apoyos/index.php/inicio/app_apoyos#/detalle/2017/68

[23] Soil Conservation Service. *National engineering handbook. Section 4. Hydrology*. U. S. Department of Agriculture. Washington, DC, USA, 1972.

[24] Torres-Rojo. *Potencial de México para la producción de servicios ambientales. INE- CIDE. Gaceta Ecológica*, no. 63, pp. 40-59, 2002.

USGS. *United States Geological Survey imagen Sentinel*. marzo 2017 [imagen de satélite]. [Online]. Available: <https://earthexplorer.usgs.gov/>