



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

Cambio de uso del suelo y su efecto en la
disponibilidad de agua en dos cuencas
hidrológicas del estratovolcán Pico de
Tancítaro, Michoacán, 1974-2014.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

MARÍA FERNANDA CONTRERAS RUBIO

**DIRECTOR DE TESIS: DR JOSÉ DE JESÚS ALFONSO FUENTES
JUNCO**

MORELIA, MICHOACÁN

MAYO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES, UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

LIC. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 02** del **H. Consejo Técnico** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **14 de febrero del 2018**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno (a) **María Fernanda Contreras Rubio** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **307048778**, con el trabajo titulado: "Cambio de uso de suelo y su efecto en la disponibilidad de agua en dos cuencas hidrológicas del estratovolcán Pico de Tancitaro, Michoacán, 1974-2014." bajo la dirección como **tutor** del **Dr. José de Jesús Alfonso Fuentes Junco**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente: Mtro. José Antonio Navarrete Pacheco
Vocal: Dra. Isabel Ramírez Ramírez
Secretario: Dr. José de Jesús Alfonso Fuentes Junco
Suplente 1: Mtro. José Francisco Sánchez Espinoza
Suplente 2: Dr. Manuel Eduardo Mendoza Cantú

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a, 26 de abril del 2018.

DR. VÍCTOR HUGO ANAYA MUÑOZ
SECRETARIO GENERAL

CAMPUS MORELIA

Apartado Postal 27-3 (Santa Ma. De Guido), 58090, Morelia, Michoacán
Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3502 y (55)56.23.73.02, Extensión Red UNAM: 80503
www.enesmorelia.unam.mx

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Escuela Nacional de estudios Superiores Morelia por hacer posible que realizara mis estudios de licenciatura, por proporcionarme las herramientas necesarias para mi formación académica.

A mi tutor José de Jesús Fuentes por darme la oportunidad de trabajar con él y sus conocimientos para realizar esta tesis.

A mis sinodales Manuel Mendoza, Isabel Ramírez, Francisco Espinoza y Antonio Navarrete, por sus excelentes comentarios y observaciones que le dieron un gran impulso a este trabajo.

A la UPLAMAT y todo el equipo, que fue un apoyo indispensable para que pudiera hacer la tesis.

*Dedicado a Fabrizio, Aketzali, Alexa y Alberto, para que
logren grandes metas.*

Gracias a mi familia por todo su apoyo a lo largo de mi carrera, a mis padres, a mis hermanas que me acompañan en el camino, como siempre a su manera.

Un especial gracias a mi tía Nora por permitirme molestarla en su casa, durante todo este proceso que fue estudiar la licenciatura.

Índice

Resumen.....	11
Abstract	12
Capítulo 1	13
Antecedentes	13
Cultivo de aguacate	13
Problemática del agua en México	14
Marco teórico.....	16
Cambio de uso de suelo	16
Problemática del agua.....	19
Relación entre el ciclo hidrológico y cambio de uso de suelo	22
Importancia de la hidrología en las montañas.....	24
Objetivo:.....	25
Objetivos particulares:	25
Justificación	25
Capítulo 2	26
Zona de estudio.....	26
Estratovolcán Pico de Tancítaro.....	26
Clima.....	26
Relieve y suelos	27
Fauna	28
Vegetación.....	28
Hidrología	30
Cuencas hidrológicas del pico de Tancítaro	30
Cuenca La culebra	31
Cuenca Tancítaro.....	32
Capítulo 3	33
Marco metodológico.....	33
Clasificación de las cubiertas y uso de suelo.....	33
Interpretación interdependiente	34
Balance hídrico	34
Precipitación.....	35

Evapotranspiración	36
Método de número de curva	37
Infiltración	40
Metodología	40
Cambio de uso de suelo	40
Infiltración y escorrentía potenciales.....	41
Precipitación.....	41
Evapotranspiración potencial.....	41
Estimación de la escorrentía potencial	42
Estimación de la infiltración potencial	45
Capítulo 4	46
Resultados	46
Cambio de uso de suelo	46
Matriz de confusión	46
Área completa (Cuencas Tancítaro y La Culebra)	47
Cubiertas y usos del suelo	47
<i>Procesos de cambio</i>	50
<i>Matrices de cambio</i>	52
<i>Tasas de cambio anual</i>	54
Cuenca Tancítaro.....	56
<i>Cubiertas y usos del suelo</i>	56
<i>Procesos de cambio</i>	59
<i>Matrices de cambio</i>	61
<i>Tasas de cambio anual</i>	62
Cuenca La Culebra	64
<i>Cubiertas y usos del suelo</i>	64
<i>Procesos de cambio</i>	67
<i>Matrices de cambio</i>	69
<i>Tasas de cambio anual</i>	71
Infiltración y escorrentía potenciales.....	73
Estimación del escurrimiento potencial.....	73
Estimación de la infiltración potencial	77
Cuenca Tancítaro.....	80

Estimación del escurrimiento potencial.....	80
Estimación de la infiltración potencial.....	84
Cuenca La Culebra.....	87
Estimación del escurrimiento potencial.....	87
Estimación de la infiltración potencial.....	90
Capítulo 5.....	94
Discusión.....	94
Conclusiones.....	99
Bibliografía.....	101

Índice de gráficas

Gráfica 1. Porcentaje de cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra del año 1974.....	47
Gráfica 2. Porcentaje de cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra del año 2000.....	48
Gráfica 3. Porcentaje de cubiertas.....	49
Gráfica 4. Comparación de las cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra. ..	50
Gráfica 5. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra de 1974 a 2000.....	54
Gráfica 6. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra de 2000 a 2014.....	55
Gráfica 7. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra de 1974 a 2014.....	55
Gráfica 8. Porcentaje de cubiertas y usos de suelo de la cuenca Tancítaro para el año 1974.	56
Gráfica 9. Porcentajes de cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancítaro para el año 2000.....	57
Gráfica10. Porcentajes de cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancítaro para el año 2014.....	58
Gráfica 11. Comparación de las cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancítaro.	59
Gráfica 12. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancítaro de 1974 a 2000.....	62
Gráfica 13. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo de la cuenca de la cuenca Tancítaro de 2000 a 2014.....	63

Gráfica 14. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo de la cuenca de la cuenca Tancítaro de 1974 a 2014.....	63
Gráfica 15. Porcentaje de cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra para el año 1974.....	64
Gráfica 16. Porcentaje de cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra para el año 2000.....	65
Gráfica 17. Porcentaje de cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra para el año 2014.....	66
Gráfica 18. Comparación del área de las cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra.	67
Gráfica 19. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo en la cuenca La Culebra de 1974 a 2000.....	71
Gráfica 20. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo en la cuenca La Culebra de 2000 a 2014.....	72
Gráfica 21. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo en la cuenca La Culebra de 1974 a 2014.....	72

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de localización.....	26
Figura 2. Imagen de localización de la cuenca La Culebra	32
Figura 3. Imagen de localización de la cuenca Tancítaro	32
Figura 4. Mapa de cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra del año 1974.	47
Figura 5. Mapa de cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra del año 2000.	48
Figura 6. Mapa cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra del año 2014.	49
Figura 7. Mapa de cambios en las cuencas Tancítaro y La Culebra de 1974 a 2000.....	50
Figura 8. Mapa de cambios en las cuencas Tancítaro y La Culebra del 2000 al 2014.....	51
Figura 9. Mapa de cambios en las cuencas Tancítaro y La Culebra de 1974 a 2014.....	51
Figura 10. Mapa de cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancítaro para el año 1974.	56
Figura 11. Mapa de cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancítaro para el año 2000.	57
Figura 12. Mapa de cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancítaro para el año 2014	58
Figura 13. Mapa de cambios en la cuenca Tancítaro de 1974 a 2000.	59
Figura 15. Mapa de cambios en la cuenca Tancítaro de 1974 a 2014.	60
Figura 16. Mapa de cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra para el año 1974.	64
Figura 17. Mapa de cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra para el año 2000.	65

Figura 18. Mapa de cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra para el año 2014.	66
Figura 19. Mapa de cambios en la cuenca La Culebra de 1974 a 2000.	67
Durante el periodo del 2000 al 2014 se deforestó el 6.5%, se degradó el 1.8% y se recuperó el 1.7%.	68
Figura 20. Mapa de cambios en la cuenca La Culebra del 2000 a 2014.	68
Figura 21. Mapa de cambios en la cuenca La Culebra de 1974 a 2014.	68
Figura 22. Mapa de escurrimiento potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra para el año 1974	74
Figura 23. Mapa de escurrimiento potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra para el año 2000	74
Figura 24. Mapa de escurrimiento potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra para el año 2014	75
Figura 26. Mapa cambios en el escurrimiento potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra del 2000 a 2014.	76
Figura 27. Mapa cambios en el escurrimiento potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra de 1974 a 2014.	76
Figura 28. Mapa de infiltración potencial en las cuencas Tancítaro y La Culebra para el año 1974.	77
Figura 29. Mapa de infiltración potencial en las cuencas Tancítaro y La Culebra para el año 2000.	78
Figura 30. Mapa de Infiltración potencial en las cuencas Tancítaro y La Culebra para el año 2014.	78
Las clases de infiltración alta y muy alta ocupan casi toda el área con el 48.8% y el 34.5% respectivamente.	78
Figura 31. Mapa cambio de la infiltración potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra de 1974 a 2000.	79
Figura 32. Mapa cambio de la infiltración potencial en las cuencas Tancítaro y La Culebra de 2000 a 2014.	79
Figura 33. Mapa cambio de la infiltración potencial en las cuencas Tancítaro y La Culebra de 1974 a 2014.	80
Figura 34. Mapa de escurrimiento potencial en la cuenca Tancítaro para el año 1974.	81
La mayoría de los escurrimientos se clasificaron como altos o bajos, con 52.4% y 41.9% del área respectivamente.	81
Figura 35. Mapa de escurrimiento potencial en la cuenca Tancítaro para el año 2000.	81
Figura 36. Mapa de escurrimiento potencial en la cuenca Tancítaro para el año 2014.	82
Dominan los escurrimientos medios y bajos ocupando 46.4% y 40.1%, respectivamente, de la cuenca.	82
Figura 36. Mapa de cambios en el escurrimiento potencial 1974-2000 en la cuenca Tancítaro.	82
Figura 37. Mapa de cambios en el escurrimiento potencial 2000-2014 en la cuenca Tancítaro.	83

Del 2000 al 2014 el escurrimiento disminuyó 265,623.6 m³ en 9.7% del área y aumentó 141,270.5 m³ en 8.5% del área. Estos cambios se dieron en pequeños polígonos distribuidos por la cuenca. 83

Figura 38. Mapa de cambios en el escurrimiento potencial 1974-2014 en la cuenca Tancítaro 83

Figura 39. Mapa de infiltración potencial en la cuenca Tancítaro para el año 1974. 84

Figura 40. Mapa de infiltración potencial de la cuenca Tancítaro para el año 2000. 84

Figura 41. Mapa de infiltración potencial de la cuenca Tancítaro para el año 2014. 85

La mayoría de la infiltración fue de clase alta con 58.5% del área, seguida de la clase muy alta con 17.2% y la clase media con 14.6% de la cuenca. 85

Figura 42. Mapa de cambios en la infiltración potencial 1974-2000 en la cuenca Tancítaro. 85

Figura 43. Mapa de cambios en la infiltración potencial 2000-2014 en la cuenca Tancítaro. 86

Del 2000 al 2014 la infiltración aumentó 265,622.4 m³ en 9.7% de la cuenca y disminuyó 141,242.2 m³ en 8.5% del área. 86

Figura 44. Mapa de cambios en la infiltración potencial 1974-2014 en la cuenca Tancítaro. 86

Figura 45. Mapa de escurrimiento potencial de la cuenca La Culebra para el año 1974. 87

Figura 46. Mapa de escurrimiento potencial en la cuenca La Culebra para el año 2000. 88

Figura 47. Mapa de escurrimiento potencial en la cuenca La Culebra para el año 2014. 88

La mayor parte de la cuenca tuvo escurrimientos de las clases bajo y medio con 49.9% y 40.5% del área respectivamente. 88

Figura 48. Mapa de cambios en el escurrimiento potencial 1974-2000 en la cuenca La Culebra. 89

Figura 49. Mapa de cambios en el escurrimiento potencial 2000-2014 en la cuenca La Culebra. 89

De 2000 al 2014 el escurrimiento disminuyó 270,567.3 m³ en 6.7% del área de la cuenca y aumentó 226,312.2 m³ en 7.4% del área, principalmente hacia la mitad de la cuenca. 89

Figura 50. Mapa de cambios en el escurrimiento potencial de 1974-2014 en la cuenca La Culebra. 90

Figura 51. Mapa de infiltración potencial en la cuenca La Culebra para el año 1974. 91

Figura 52. Mapa de infiltración potencial de la cuenca La Culebra para el año 2000. 91

La infiltración de clase alta dominan la cuenca, la clase muy alta ocupa el 47.7% del área, la clase alta ocupa el 37%, en cambio la clase baja ocupa 11.2% del área. 91

Figura 53. Mapa de infiltración potencial de la cuenca La Culebra para el año 2014. 92

Figura 54. Mapa de cambios en la infiltración potencial 1974-2000 en la cuenca La Culebra. 92

De 1974 al 2000 la infiltración aumentó 1'051,217.2 m³ hacia el suroeste de la cuenca y disminuyó 267,268.7 m³. 92

Figura 55. Mapa de cambios en la infiltración potencial 2000-2014 en la cuenca La Culebra. 93

Figura 56. Mapa de cambios en la infiltración potencial 1974-2014 en la cuenca La Culebra. 93

Índice de tablas

Tabla 1. Características morfométricas básicas de las cuencas del Tancítaro.....	31
Tabla 2. Tabla de asignación de número de curva.....	43
Tabla 3. Matriz de error	46
Tabla 4. Matriz de transición de cubiertas en el área completa 1974-2000.....	52
Tabla 5. Matriz de transición de cubiertas en el área completa 2000-2014.....	53
Tabla 6. Matriz de transición de cubiertas en al área completa 1974-2014.....	53
Tabla 7. Matriz de transición de cubiertas de la cuenca Tancítaro 1974-2000.	61
Tabla 8. Matriz de transición de cubiertas de la cuenca Tancítaro 2000-2014.	61
Tabla 9. Matriz de transición de cubiertas de la cuenca Tancítaro 1974-2014.	62
Tabla 10. Matriz de transición de cubiertas en la cuenca La Culebra 1974-2000.....	69
Tabla 11. Matriz de transición de cuibiertas en la cuenca La Culebra 2000-2014.....	70
Tabla 12. Matriz de transición de cubiertas en la cuenca La Culebra 1974-2014.....	70
Tabla 14. Escurrimiento de las cuencas Tancítaro y la Culebra.	73
Tabla 17. Infiltración de la cuenca Tancítaro	84
Tabla 18. Escurrimiento de la cuenca La Culebra.....	87
Tabla 19. Infiltración en la cuenca La Culebra.....	90

Resumen

El cambio de uso de suelo se encuentra en el centro de la investigación ambiental actual debido a que constituye uno de los mecanismos del deterioro ambiental. Son diversos los factores que originan el cambio de uso de suelo, estos pueden ser de carácter biofísico, económico y tecnológico, demográfico, institucional y cultural. El cambio de uso de suelo se convierte en la principal causa de pérdida de diversidad biológica, funciones ecológicas y de la alteración del ciclo hidrológico, incluidos la evapotranspiración, precipitación y temperatura de la superficie del suelo. Los bosques desempeñan un papel muy importante en la regulación del ciclo hidrológico. El objetivo de esta tesis es comparar el cambio de uso de suelo en dos cuencas del pico de Tancítaro y su efecto en la disponibilidad de agua, a través del componente de infiltración. La generación de datos de uso de suelo implicó realizar una interpretación interdependiente, primero se realizó la interpretación de imágenes satelitales obtenidas de Google Earth para el año 2014, siguiendo con fotografías aéreas de los años 2000 y 1974 usando el programa ILWIS 3.3. El análisis de cambio implicó la elaboración de matrices de transición para los años 2014-2000, 2000-1974 y 2014-1974, así como el cálculo de las tasas de cambio y reconocimiento de los procesos de cambios generales ocurridos en las cuencas (deforestación, degradación y recuperación). La disponibilidad de agua se infirió por medio de la infiltración, esta se calculó con la siguiente ecuación: $\text{infiltración} = \text{precipitación} - \text{evapotranspiración} - \text{escorrentía}$. La escorrentía se calculó con el método del número de curva, relacionando las cubiertas y uso de suelo de cada año con el suelo para obtener los números de curva correspondientes a cada fecha trabajada. La evapotranspiración se calculó con la ecuación de Thornthwaite. En 1974 las cubiertas de suelo predominantes fueron el bosque de pino-encino y cultivos de temporal; para el 2000 predominó la clase de bosque de pino-encino, seguida por los cultivos permanentes; en el 2014 las cubiertas principales son los cultivos permanentes, seguidos del bosque de pino-encino. El principal cambio en las cubiertas fue el paso de cultivos de temporal a cultivos permanentes. En la cuenca Tancítaro los cultivos permanentes aumentan más rápido que en La Culebra, pero en las dos cuencas la deforestación fue baja, ya que ésta se había dado antes de la introducción del aguacate. La escorrentía aumenta cada año y la infiltración va disminuyendo debido a la introducción de los cultivos de aguacate, aunque no se garantiza la calidad del agua que se almacena.

Abstract

Land use change is in the center of current environmental research trend, because it constitutes one of the mechanisms of environmental deterioration. There are various factors that cause land use change, these can be biophysical, economic and technological, demographic, institutional and cultural. Land use change has become the main cause of loss of biological diversity, ecological functions and the alteration of the hydrological cycle, including evapotranspiration, precipitation and temperature of the soil surface. Forests play an important role in the regulation of the hydrological cycle. The main objective of this thesis is to compare the land use change in two basins of the Tancítaro peak and its effect on the water availability, based on infiltration estimation. The land use generated by the interdependent interpretation method. First, satellite images from the 2014 on Google Earth platform were interpreted, then the aerial photographs of 2000 and 1974 were interpreted on screen monitor using the ILWIS 3.3 program. The change matrices of the years 1974-2000, 2000-2014 and 1974-2014 were obtained, as well as the exchange rates and the identification of general changes patterns occurred in the basins (deforestation, degradation and recovery). The availability of water was inferred through infiltration, which was calculated with the following equation: $\text{infiltration} = \text{precipitation} - \text{evapotranspiration} - \text{runoff}$. The runoff was calculated based on the curve number method, the land covers for each year were related to the soil to obtain the corresponding number curve by year. Evapotranspiration was calculated with the Thornthwaite equation. In 1974 the predominant land cover classes pine-oak, followed by rainfed crops with; in 2000 the pine-oak was also predominant, followed by permanent crops; in 2014 the main land covers were permanent crops, followed by pine-oak. The main change in the covers was the change from rainfed crops to permanent crops. In the Tancítaro basin, permanent crops increased faster than in La Culebra, but in the two basins, deforestation was low, because it occurred before the introduction of the avocado orchards. Runoff increases every year and infiltration decreases due to the introduction of avocado crops, which act as a forest plantation, although the quality of the water stored is not guaranteed.

Capítulo 1

Antecedentes

Cultivo de aguacate

México es el principal productor y exportador de aguacate en el mundo (SAGARPA, 2011); en especial Michoacán se destaca por el cultivo de aguacate de la variedad Hass que representa el 29% del total de la superficie plantada a nivel nacional (Bravo, et al, 2009) y el 85% del total de la producción (SAGARPA, 2011). El 80.8% de la superficie con aguacate en Michoacán corresponde a los municipios de Tancítaro, Uruapan, Peribán, Ario de Rosales, Tacámbaro, Nuevo Parangaricutiro y Salvador Escalante (Salazar-García, et al, 2004). En los últimos años se ha venido conformando una franja aguacatera de 22 municipios productores, de los cuales 10 municipios son los más importantes, ya que en estos se genera el mayor volumen de producción (De la Tejera, et al, 2013).

Al ser Michoacán el principal exportador mundial de aguacate, existe un fuerte incentivo económico y social para que se siga incrementando este cultivo (Bravo, et al, 2009). En 2010 el aguacate generó un valor de 12,640.7 millones de pesos, las juntas locales de sanidad vegetal registran para este mismo año 17,538 productores de aguacate en Michoacán y se estima que todo el proceso productivo genera alrededor de 47 mil empleos directos, 70 mil empleos estacionales y 187 mil empleos indirectos (De la Tejera, et al, 2013).

El cultivo del aguacate se inició de manera sistemática en los años 50 como árboles de sombra para el cultivo del café en la región de Uruapan, pero hacia los años 60 se introdujo de California la variedad de aguacate hass (Garibay y Bocco, 2007). Empero este cultivo empezó su expansión fuertemente a principios de los años 70, en los municipios de Uruapan y Péríban, en donde en un periodo de 20 años aumento su superficie en un 500% (Ramírez y Morales, 2009). En 1980 el porcentaje que ocupaba el aguacate respecto a la superficie total de frutales era del 42% (con 21,241 ha), y para 2009 este porcentaje había crecido a 55% (103,602 ha) (De la Tejera, et al, 2013).

El cultivo de huertas de aguacate trajo consigo el abandono del cultivo de maíz, que prácticamente de los municipios de Ziracuaretiro, Tingambato, Uruapan, San Juan Nuevo, Tancítaro, Peribán y Los Reyes (Bravo, et al, 2009). La expansión de huertas de aguacate ha sido uno de factores de la conversión de bosques a cultivos,

especialmente con la presión de la demanda internacional de aguacates, que se ha incrementado desde que la exportación a mercados europeos y asiáticos comenzó durante 1980 y en Norteamérica desde 1990, cuando entró en vigor el Tratado de libre comercio (Bravo-Espinosa, *et al*, 2012).

En la región aguacatera, el cambio de uso de suelo no está igualmente distribuido a través de la región, además la deforestación rápida ocurrió en la región varios años antes de que la producción de aguacate se expandiera y coincidió con dos cambios de política: la reforma al artículo 27 y la Ley Forestal de 1992 (Barsimantov y Antezana, 2008). Por otro lado, con la corrupción gubernamental se ha impedido que la mayoría de las comunidades hagan el aprovechamiento de sus recursos forestales a su manera (Garibay y Bocco, 2007).

Problemática del agua en México

México está entre los diez países que más usan agua en el mundo (WWAP, 2009). Y debido al crecimiento de la población y la producción agrícola e industrial, y por lo tanto el incremento en la demanda, la disponibilidad de agua por persona es cada vez más limitada (Oswald, 2011). Los problemas relacionados con el agua en México tienen que ver con los problemas en la cantidad, calidad, distribución y uso de este recurso (Manson, 2004).

La precipitación promedio anual en México es de 775 mm, equivalente a 47980 m³/s, de esta cantidad, 72% se evapotranspira, 26% escurre superficialmente y solo 2% se emplea (Torregrosas, *et al*, 2012). De la cantidad que se emplea el 77% se utiliza para la agricultura, 14% para abastecimiento público, 5% para generación de energía en plantas termoeléctricas y 4% para la industria autoabastecida (CONAGUA, 2014).

México tiene un problema de distribución regional y temporal del agua, pues la disponibilidad de agua en el país tiene variaciones periódicas, con la temporada de lluvias entre junio y octubre, el resto del año está marcado por la temporada de secas; es por esta variabilidad en el espacio y el tiempo de los procesos naturales, junto con las incertidumbres del mercado y la globalización de la economía que los tomadores de decisiones han buscado un enfoque integrado para hacer frente a los problemas de gestión del agua (Oswald, 2011).

En los últimos 25 años, el Estado mexicano ha implementado un profundo proceso de reestructuración para manejar el agua, transformando la estructura legal, llevando un importante proceso de desconcentración y descentralización (Torregrosas, *et al*, 2012). Una de las líneas de política centrales es la participación

social en la gestión del recurso, además se busca la resolución de los conflictos en torno a dicha gestión y a los servicios de agua y saneamiento (Castro, *et al*, 2005). Como resultado surgen los organismos operadores de agua potable, estos poseen esquemas muy diversos, ya sea que puedan ser administrados por los municipios, o bien son organismos intermunicipales y otros más son juntas o comisiones estatales (Torregrosas, *et al*, 2012).

A pesar de lo anterior, ha habido un fracaso recurrente en la administración del agua, ya que no se toman en consideración las capacidades institucionales y los recursos de las autoridades encargadas del agua, los gobiernos estatales y los consejos de cuenca, además no se han sido considerados otros actores que tienen alguna repercusión en materia de agua (Oswald, 2011). Por ejemplo, en muchos casos la distribución en localidades y municipios es por tanteo y la calidad del agua tiene problemas, además lo que se recauda es muy poco y está por debajo de los costos de operación. (Torregrosas, *et al*, 2012).

No obstante, la administración del agua no está solamente en manos de las autoridades, pues cuidar el agua es una tarea que involucra a toda la sociedad (Oswald, 2011). De esta suerte, muchas comunidades han sido capaces de administrar su agua bajo esquemas de autogestión y han logrado tener un buen funcionamiento, a comparación con la administración municipal y los organismos operadores que funcionan en números rojos, tienen deudas por el consumo de energía eléctrica y, aún con estos problemas, mantienen bajas las cuotas (Torregrosas, *et al*, 2012). Encima la planeación y gestión del agua se basan en el crecimiento demográfico y en las actividades económicas, sin tomar en cuenta todos los demás factores que se involucran en la gestión (Montesillo-Cedillo, 2017).

A pesar de las mejoras implementadas en la administración del agua, los principales problemas en México siguen siendo centralización, participación social acotada y beneficios distribuidos de manera selectiva (Torregrosas, *et al*, 2012). Asimismo, el modelo de participación se limita a la consulta, no se han creado canales institucionales estables, confiables y eficientes que permitan a la población tomar decisiones junto al gobierno (Castro, *et al*, 2005).

La contaminación del agua, por otro lado, se ha vuelto un problema grave, “la agricultura, con su alta demanda de agua para riego, fertilizantes, pesticidas y otros agroquímicos, así como las ganaderías intensivas que generan montos enormes de residuos que son las causas principales del deterioro del agua” (Pérez Espejo, 2012, pp. 24). Aunado a ello, los hogares pobres son los que más sufren con los problemas relacionados al agua, pues son estos hogares los que tienen que sacrificar una mayor proporción de su ingreso para proveerse de agua (Torregrosas, *et al*, 2012).

Marco teórico

Cambio de uso de suelo

El ritmo, la magnitud y el alcance de las alteraciones humanas en la tierra son más grandes actualmente que en épocas pasadas, siendo las más importantes aquellas que se relacionan con los cambios en la cubierta y uso de suelo (Lambin, *et al*, 2001). En este marco, los estudios sobre los procesos de cambio en la cubierta y uso del suelo se encuentran en el centro de la atención de la investigación ambiental actual, puesto que el análisis de dicho cambio representa una manera para entender los mecanismos del deterioro ambiental y constituye una guía útil para la toma razonable de decisiones sobre el uso del suelo (Ibarra-Montoya, *et al*, 2011).

“La cubierta del suelo ha sido definida como los atributos de la superficie y el subsuelo inmediato de la Tierra, incluida la biota, el suelo, la topografía, el agua y las estructuras humanas” (Lambin y Geist, 2006, pp 4). El suelo tiene diferentes valores para el uso humano, este valor puede ser económico, dependiendo de aquello que se pueda construir o ser un valor psíquico o emocional (Platt, 2014). De acuerdo a Velázquez, *et al*, (2014) el uso del suelo puede ser definido como la expresión cultural de las prácticas de apropiación del territorio. Es decir, los fines para los cuales los seres humanos aprovechan la cubierta de la tierra, dichos fines dirigen la forma en que se manipulan los atributos biofísicos de la tierra y la intención por la cual se manipulan (Lambin y Geist, 2006).

El cambio del uso del suelo se expresa en el reemplazamiento de un tipo de cubierta por otra y está definido por los motivos que tienen los humanos para explotar la cubierta, y los recursos, de la tierra (Ibídem). También se refiere a la dinámica de las prácticas de apropiación del territorio (Velázquez, *et al*, 2014). Esta dinámica depende de cómo la gente toma decisiones entorno al uso de suelo y como los diversos factores en contextos específicos, a escala local, regional o global, tienen influencia en esas decisiones (Geist, *et al*, 2006).

Son diversos los factores que originan el cambio de uso de suelo, estos pueden ser de carácter biofísico, económico y tecnológico, demográfico, institucional y cultural (Geist, *et al*, 2006). Lo cual vuelve complejo el proceso de cambio de uso de suelo, por lo cual, una respuesta simplista basada en el crecimiento demográfico, la pobreza y la infraestructura no llega a ser adecuada para entender la dinámica sobre el cambio de uso de suelo (Lambin, *et al*, 2001). La forma en la que se da el cambio de cubierta y uso de suelo, en procesos como la deforestación, resulta de la conexión de distintos sucesos (por ejemplo arreglos institucionales, los sistemas dominantes de uso de suelo, la tecnología, la topografía y la distribución espacial de los recursos) que operan a distintas escalas, tanto nacionales y regionales así como mundiales, pues la globalización amplifica o atenúa las fuerzas del cambio,

de tal manera que los cambios rápidos de uso de suelo a menudo suelen coincidir con la incorporación de una región a la expansión económica mundial (Brondizio y Moran, 2012).

Las causas inmediatas del cambio de uso de suelo son aquellas actividades que afectan directamente las cubiertas, siendo principalmente la expansión agrícola, la extracción maderera y la expansión de la infraestructura; sin embargo, la expansión agrícola es, por mucho, la principal causa asociada a casi toda la deforestación mundial (Geist y Lambin, 2002). De entre las razones de la intensificación de la agricultura están la escasez de tierras, los mercados, que regulan los tipos de cultivo, y la intervención del estado, instituciones u ONG con proyectos que promueven el desarrollo en una región o sector económico (Lambin, et al, 2001).

Las fuerzas subyacentes son múltiples procesos y factores actuando de forma sinérgica, de manera tal que guían las causas directas, entre los principales factores subyacentes indicados están los factores demográficos, económicos, tecnológicos, políticos/institucionales y culturales o socio-políticos y pueden ser nacionales o mundiales (Geist y Lambin, 2002).

Las razones que tienen los actores pertenecientes a alguna institución gubernamental incluyen el reclamo de seguridad territorial, en modo de políticas nacionales, atraer capital internacional, facilitar oportunidades de mercado o promocionar los intereses de grupos específicos (Lambin, et al, 2001). Los procesos a escalas grandes, como las políticas nacionales y las demandas del mercado, establecen las condiciones en las que operan los niveles a nivel local, sin embargo, los grupos sociales reaccionan de diferentes maneras a las distintas condiciones que se dan a niveles superiores, lo que ocasiona que las respuestas de la gente sean impredecibles (Brondizio y Moran, 2012)

Para poder entender el impacto ocasionado por el cambio cubierta y uso del suelo, se tienen que estudiar los factores ambientales y socioeconómicos que determinan como se usa el suelo (Bocco, *et al*, 2001). La identificación de los factores que causan el cambio requiere una comprensión del cómo las personas toman decisiones sobre el uso de suelo, de cuáles son los factores que influyen en la toma de decisiones y de cómo estos factores interactúan en contextos específicos a escala local, regional o global para influir en esa toma de decisiones (Geist, *et al*, 2006). Por ejemplo, los factores institucionales pueden ser clave en los cambios de cubierta, degradando los paisajes o, como en el caso de la zona maya de Quintana Roo, tender hacia la sostenibilidad (Bray, *et al*, 2004).

Aunque los factores económicos parecen jugar un fuerte rol en la toma de decisiones, varios estudios demuestran que los cambios de uso de suelo son el resultado de las respuestas individuales y sociales a las condiciones presentes, pues los usuarios tienen varias motivaciones, memorias colectivas e historias personales, que junto a sus actitudes, valores, creencias y percepciones individuales afectan las decisiones en torno al uso del suelo (Geist, *et al*, 2006). Por

ejemplo, si el régimen de propiedad es de tipo privado, ya sea sobre la tierra u otro tipo de recursos, el dueño de dicha propiedad privada es el que toma las decisiones del uso del suelo, determina cómo utilizar mejor la parcela y cuando debe ocurrir un cambio a la luz de las circunstancias geográficas, económicas, legales y personales (Platt, 2014).

El ser humano en busca de satisfacer sus necesidades básicas y producir toda clase de bienes, maneja y altera sus paisajes, la cobertura vegetal, el suelo y el agua (Toledo, 2006); de este modo el uso de suelo se convierte en la principal causa de pérdida de diversidad biológica, funciones ecológicas y de la alteración del ciclo hidrológico (Rosette y Bocco, 2008). Las cubiertas y los cambios en la tierra afectan los flujos de materiales y energía que sustentan la biosfera, alterando las fuentes de donde provienen y los lugares donde se almacenan, incluidas las emisiones de gases y el ciclo hidrológico (Lambin y Geist, 2006).

“Los cambios locales en el uso del suelo son tan penetrantes que, al momento de acumularse a escala mundial, pueden afectar de manera significativa las funciones que son soporte vital de vida humanos” (Chhabra, *et al*, 2006, pp71). La gama que se ha identificado de los impactos causados por el cambio de uso de suelo y cubiertas sobre los bienes y servicios ecosistémicos, es muy amplia (Lambin y Geist, 2006).

Para que los patrones de uso del suelo sean sostenibles, se deben equilibrar el interés de cuidar los servicios ecosistémicos con los intereses económicos, de manera que puedan sostenerse los medios de vida locales (Chhabra, *et al*, 2006). Sin embargo, el manejo de recursos comunes extensos e impredecibles como el agua, el aire, los bosques y otros, constituye un enorme problema para los gobiernos y comunidades, especialmente cuando afecta a múltiples usuarios (Maldonado, 2006). Las cuencas contienen varios de estos recursos comunes (agua, suelo, vegetación y fauna), los cuales a su vez tienen múltiples usos, de tal manera que la cuenca se convierte en un recurso común que debe ser manejado no solo de manera individual, sino también de forma colectiva (Ravnborg y Del Pilar, 1999).

El cambio de uso de suelo se incrementó en el siglo XX, especialmente con la intensificación de la agricultura, la deforestación en el cinturón forestal tropical, los incendios frecuentes a nivel mundial y regional en América del Sur, África del Sur y partes de Rusia, y la urbanización en ciudades de todo el mundo (Lambin, *et al*, 2001). Además, los cambios de uso de suelo han ocurrido de maneras distintas en diferentes partes del mundo, por ejemplo, en el Amazonas ha habido un rápido cambio de selva original a agricultura intensiva, mientras que en India y China este cambio fue más lento, por otro lado, en el este de estados unido ha vuelto el bosque e incluso el bosque se ha mantenido como en la Centroamérica Maya (De Fries, *et al*, 2004).

Hoy en día, aproximadamente el 33% del suelo en el mundo está bajo uso agrícola, ya sea como cultivos (12%) o pastizales (21%), y se estima que, en las próximas décadas, la expansión de áreas de cultivo será probablemente el mayor factor de cambio en el África subsahariana y en Latinoamérica (Lambin y Geist, 2006).

En México se observan una gran cantidad de cambios en la cubierta del suelo, que en general están por arriba de la media mundial en cuanto a tasas de deforestación, incremento de las áreas de cultivo y pastoreo, y expansión urbana, en especial existe un importante incremento en los pastizales y cultivos, así como una importante disminución de las áreas forestales, con tasas de deforestación de 0.25, 0.76 y 0.33% por año para bosque, selva y matorrales respectivamente. (Mas, *et al*, 2009). Aunque estas tasas de cambio presentan una gran variación tanto a nivel regional como local (Dupuy, *et al*, 2007).

Los ecosistemas de bosque de pino y encino son los preferidos de los seres humanos para el establecimiento de sus asentamientos y para la siembra de muchos de sus cultivos más importantes, varios autores consideran que son los ecosistemas que más han sido transformados por estos usos y, por lo tanto, están entre los ecosistemas menos conservados en el país (Challenger, 2003).

En Michoacán la tasa de pérdida de bosques (1.8%) es el doble que la estimada a nivel nacional, pues los procesos de pérdida y deterioro de los bosques y selvas ocurren por un descontrol en la actividad forestal (Bocco, *et al*, 2001). En la región purépecha la pérdida de bosques tuvo una tasa de -0.33 o 690 ha por año, siendo los más afectados los bosques de coníferas y coníferas latifoliadas, y, por otra parte, se incrementó la frontera agrícola en 13,901 ha entre 1976 y 2005, con un ritmo de crecimiento de 479 ha por año, siendo la agricultura del aguacate el uso de suelo que presenta el mayor crecimiento en la región (Garibay y Bocco, 2007).

Problemática del agua

El agua es un recurso fundamental para la vida, sin embargo, la tierra, sus habitantes y todas sus formas de vida nos enfrentamos en este comienzo del siglo XXI con una grave crisis del agua (WWAP, 2003), debido a que las aguas dulces del mundo se han convertido en un bien escaso, amenazado y en peligro (Toledo, 2006). Esta crisis es ocasionada principalmente por el crecimiento poblacional y el aumento en la demanda de agua que esto conlleva, por lo que esto se ha vuelto uno de los problemas globales más urgentes que enfrenta actualmente la humanidad (Sophocleous, 2004).

El crecimiento demográfico y el desarrollo económico hacen una fuerte presión sobre el sistema hidrológico mundial, que aunado a la falta progresiva de agua y su contaminación plantean una búsqueda de soluciones a estos grandes retos

(WWAP, 2003). Simplemente en los últimos 50 años la extracción de agua se ha triplicado (WWAP, 2009). Con este crecimiento de la población y las proyecciones de alta demanda de agua, las estimaciones globales sugieren un peligroso panorama de baja disponibilidad de agua (Sophocleous, 2004).

Los ecosistemas de agua dulce son fundamentales para preservar la biodiversidad y el bienestar humano (WWAP, 2006), pero estos están siendo intensamente modificados y degradados por las actividades humanas (Johnson, *et al*, 2001). Los factores de mayor impacto sobre los recursos hídricos son los cambios en el paisaje, derivados de la eliminación, destrucción o inutilización de los ecosistemas naturales, estos cambios, que son palpables en procesos de deforestación, urbanización y aumento de la agricultura, influyen de manera significativa en la calidad y cantidad de los caudales de agua (WWAP, 2003).

Sin embargo, los problemas de agua no se aprecian a escala global, pues a este nivel hay agua suficiente para la humanidad, todos los problemas se manifiestan a escalas menores (Sophocleous, 2004), ya que los seres humanos extraen menos del 10% del máximo disponible de los recursos renovables de agua dulce en el mundo (Oki y Kanae, 2006). El problema radica en que la disponibilidad del agua tiene una alta variabilidad en el espacio (la mayor parte de estos recursos se ubican en Asia y Sudamérica y los montos menores se encuentran en Europa, Australia y Oceanía) y en el tiempo (especialmente la variabilidad a lo largo del año), por esto es impráctico para la sociedad humana usar al 100% los recursos de agua dulce. (Oki y Kanae, 2006; Toledo, 2002).

A pesar de que el agua dulce se recicla de forma natural, la velocidad en la que circula y se renueva está determinada por el sistema (Oki y Kanae, 2006). Es decir, los ríos y otras fuentes de agua están sometidos a diversos cambios diarios y estacionales en sus características fisicoquímicas y bióticas que determinan su calidad y cantidad (Toledo, 2006). Por ello, la disponibilidad de agua depende, en gran medida, de la estación del año, por lo que puede haber una grave escasez de agua en los períodos secos y un exceso de agua durante la estación húmeda, que dependiendo como se mida la disponibilidad puede no ser visible (WWAP, 2003).

La agricultura tiene un desproporcionado impacto sobre el flujo de agua (con las presas), la calidad del agua y la alteración de los hábitats acuáticos, comparado con los usos doméstico e industrial (Johnson, *et al*, 2001). Desde una perspectiva de cómo se usa, el agua en el mundo puede dividirse en dos grupos: en un grupo de países (en África, la mayoría de Asia, Latinoamérica y el caribe) la agricultura es por mucho la actividad que más usa agua, mientras en el otro grupo (en Europa y Norteamérica) la extracción está en su mayoría relacionada con la industria y la energía (WWAP, 2009).

Por consiguiente, la agricultura está siendo vigilada, debido a que reduce mucho los recursos hídricos y compite con otros sectores por el agua (WWAP, 2006). Especialmente porque durante las últimas décadas, el mayor incremento en la

demanda de agua se debió al incremento de los rendimientos agrícolas a raíz de la Revolución Verde (Sophocleous, 2004).

Sin embargo, la cantidad de agua disponible para la agricultura es cada vez más reducida a causa de la degradación de los ecosistemas y la competencia con otros sectores (WWAP, 2006). Por lo que, el uso del agua en la agricultura es un tema que se ha estudiado desde diferentes perspectivas, especialmente en relación con la gestión del recurso, la organización social, los conflictos, los procesos hidrofísicos, las políticas y los efectos de los contaminantes (Pérez Espejo y Aguilar Ibarra, 2012).

La mayor parte del agua de la que se alimentan las plantas, incluyendo las cultivadas, procede de la lluvia (WWAP, 2006). Por lo que las tierras de cultivo en el mundo son en su mayoría de agricultura de temporal, la cual es responsable de aproximadamente 60% de la producción de cultivos (WWAP, 2009). Sin embargo, la irrigación es la mayor consumidora de agua dulce del planeta, aunque solo representa alrededor del 10% del agua usada para fines agrícolas (WWAP, 2006). Además, el agua utilizada en la irrigación es extraída de lagos, ríos y acuíferos, y compite con otros sectores por el agua (WWAP, 2009).

“Los impactos negativos sobre la calidad y cantidad de agua dulce repercuten en la prosperidad económica y la estabilidad social, además de la resiliencia de los servicios ecosistémicos” (Jackson, *et al*, 2001, pp 2). La verdadera tragedia de la crisis del agua es su efecto sobre la vida cotidiana de las poblaciones pobres, las cuales deben sufrir el peso de las enfermedades relacionadas con el agua, aparte de vivir en entornos degradados y a menudo peligrosos (WWAP, 2003). Por lo que asegurar que un suministro adecuado de agua esté disponible para todos es esencial para el bienestar humano (Oki y Kanae, 2006).

El cómo y quién está involucrado en la forma en la que se usa el agua afecta la cantidad de las aguas superficiales y subterráneas, los niveles de contaminación y determina la proporción de agua que corresponde a los usuarios aguas arriba y aguas abajo, por lo que una adecuada gestión del agua se vuelve fundamental para asegurar el bienestar de las personas (WWAP, 2006).

Los gobiernos locales y municipales desempeñan por ello, un papel fundamental en la gestión hídrica, pues es necesario que se asegure un buen abastecimiento de agua, el saneamiento y la recogida de aguas residuales (WWAP, 2006). De tal manera que los servicios de agua suelen ser administrados por funcionarios e instituciones locales específicas (WWAP, 2009). Sin embargo, la gobernanza del sector agua es compleja e involucra actores más allá de este sector, como lo son legislaturas y gobiernos nacionales, gobiernos locales, autoridades de cuenca, representantes de la población indígena, organizaciones de consumidores, compañías privadas y otros, pues el agua es usada por todos (WWAP, 2009).

La gestión de los recursos hídricos siempre tendrá que afrontar el desafío de equilibrar las necesidades de los diferentes usuarios del agua con la conservación de las especies, los hábitats y las funciones de los ecosistemas, de esta manera el reto es evitar posibles conflictos y hacer un buen programa de gestión de recursos hídricos que integre todo lo anterior (WWAP, 2006).

Se debe tomar en cuenta que el agua, como recurso, tiene varias características que lo hacen diferente a otros recursos y lo vuelven más difícil de administrar, pues es indiscutiblemente necesaria para la vida humana, su valor monetario es relativamente minúsculo y suele transportarse por sí misma, en muchos casos, desde su punto de origen hasta donde será usada por las personas (Kelly, 2012).

Los conflictos tienen lugar, sobre todo, entre aquellos usuarios que comparten la misma fuente de agua, esta situación de conflicto a menudo es exacerbada por los valores tradicionales, los hábitos y costumbres, los factores históricos y los caprichos de la geografía (WWAP, 2006). Por otro lado, los conflictos y la inestabilidad (o estabilidad) regional pueden influir en la demanda y uso del agua (WWAP, 2009).

Relación entre el ciclo hidrológico y cambio de uso de suelo

La relación entre el cambio de uso de suelo e hidrología es de interés mundial (Calder, 1998). Sin embargo, mucho de la investigación sobre las consecuencias de cambio de uso de suelo se ha enfocado en dos temas: las emisiones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero junto a la alteración en el intercambio de energía y agua, y los efectos sobre la pérdida de hábitat y biodiversidad; por el contrario, las consecuencias para la hidrología han recibido poca atención (DeFries y Eshleman, 2004).

En el pasado, los efectos del cambio de uso de suelo sobre los recursos hídricos fueron muy descuidados o se consideraron un subproducto del progreso (Shilling, *et al*, 2008); sin embargo, “hoy en día está reconocido que los cambios de uso de suelo tienen efectos substanciales sobre elementos atmosféricos claves del ciclo hidrológico, incluidos la evapotranspiración, precipitación y temperatura de la superficie del suelo” (Stonestrom, *et al*, 2009, pp. 1).

Existe un gran número de factores biofísicos que se entrelazan y controlan la ruta del agua en el ciclo hidrológico, tales como los topográficos, geológicos y climáticos, pero el suelo, la vegetación y los cambios en la cubierta y usos del suelo son los que más afectan el curso del agua (Toledo, 2006). Por ejemplo, la pendiente incrementa el flujo del agua, mientras que la densidad de la vegetación aumenta la infiltración (Dunne, *et al*, 1991). A lo largo del tiempo, las actividades antropogénicas han ocasionado el cambio de los flujos de agua dulce de los principales ríos del

mundo, además de haber cambiado las tasas de evaporación y haber empeorado la calidad del agua por el incremento sustancial de los desechos tóxicos (Toledo, 2002).

Por consiguiente, “las decisiones de uso de suelo pueden potencialmente afectar la cantidad y calidad del agua” (Kelly y Hilton, 2015, pp.1), pues en su tránsito por la tierra, el agua está expuesta a la superficie terrestre cuyas propiedades impactan la calidad y la cantidad de agua dulce, especialmente con el cambio de cubierta/uso de suelo (Lambin y Geist, 2006). Debido a ello, el uso de suelo es inseparable de la gestión de recursos hídricos (Platt, 2014).

Las consecuencias para la hidrología por el cambio de uso de suelo son: cambios en la demanda de agua por los cambios en las prácticas de uso de suelo, tales como la irrigación y la urbanización; cambios en el suministro de agua por la alteración de procesos hidrológicos de infiltración, recarga de aguas subterráneas y la escorrentía; y cambios en la calidad del agua por la escorrentía agrícola y el desarrollo suburbano (Blöschl, *et al*, 2007).

Sin embargo, las consecuencias hidrológicas en las cuencas, como resultado de la deforestación son altamente variables y dependen de una amplia gama de factores (Lambin, 2006). Por ejemplo, “el cambio de uso de suelo es un fenómeno local, por lo que el impacto de cualquier perturbación está fuertemente ligado al tamaño de la cuenca” (Blöschl, *et al*, 2007, pp.1244). En la escala de la cuenca, la tala de bosques generalmente da como resultado un aumento de la escorrentía (Lambin y Geist, 2006).

La cubierta vegetal, en especial los bosques, desempeña un papel muy importante en la regulación del ciclo hidrológico, debido a que el agua de lluvia se intercepta de manera muy eficiente por los grandes árboles de bosques y selvas, mismos que protegen el suelo de los impactos directos de las gotas de lluvia, además estos suelos forestales tienen mayor capacidad de infiltración que los pastizales o cultivos dado que la densa hojarasca y la alta porosidad de los suelos permiten la lenta infiltración del agua hacia el subsuelo y la recarga de los mantos acuíferos (Gallart y Llorens, 2003; Manson, 2004; Toledo, 2006).

Además, los bosques son importantes fuentes de abastecimiento para los acuíferos, debido a que los bosques, o la vegetación natural, tienen una alta tasa de infiltración, comparado con aquellos que han sido manejados, con otros tipos de vegetación y otros usos de suelo (Gonzaga Giraldo, 2002; Neris, *et al*, 2009). Conforme a lo anterior, Zapata-Sierra y Manzano-Agugliaro (2008) encontraron que, aunque la cubierta arbórea en general favorece la infiltración, los árboles forestales son más eficientes aumentando la infiltración, que árboles frutales presentes en cultivos.

Se conoce que los bosques ubicados en las partes altas de la cuenca afectan la magnitud del escurrimiento, disminuyendo las corrientes fuertes (Toledo, 2006).

Meunier (1996) en su estudio en dos cuencas de montaña confirma que el bosque desempeña un papel muy importante en la formación de las crecidas en montaña.

Una forma de evidenciar la relación entre el ciclo hidrológico y el cambio de uso de suelo, es mediante el uso de modelos que consideren la variación espacial de cada parámetro y variable hidrológica (como infiltración, escurrimiento, evapotranspiración, etc.) dentro de la cuenca (Mendoza, *et al*, 2002). Los modelos permiten entender la causas y consecuencias del cambio de uso de suelo en patrones tanto espaciales como temporales, para lo cual se ha progresado en la adquisición de datos de percepción remota (Irwin y Geoghegan, 2001).

En los países en desarrollo, la obtención de datos climáticos e hidrológicos es deficiente, por lo que se requiere usar métodos indirectos que permitan obtener resultados con los pocos datos disponibles; donde además se reconozca la distribución espacial de los componentes bióticos y abióticos de las cuencas, así como las relaciones espaciales y temporales entre estos factores (Mendoza, *et al*, 2002).

Importancia de la hidrología en las montañas

Cuando hablamos de recursos hídricos, el término "torres de agua" expresa la importancia de las montañas como proveedoras de agua dulce, no obstante, todavía se discuten en la actualidad cifras precisas sobre la importancia hidrológica de las montañas a escala mundial, aunque los principios de la vinculación hidrológica de tierras altas y tierras bajas han sido reconocidos desde hace mucho tiempo (Viviroli, *et al*, 2007).

“La hidrología de las áreas montañosas se caracteriza por una descarga de agua desproporcionadamente grande, usualmente del doble de la cantidad que se esperaría en proporción al área de la sección montañosa” (Messerli, *et al*, 2003). Este fenómeno es posible porque los paisajes montañosos se caracterizan por su altitud y pendientes que, dependiendo la exposición y la inclinación de las pendientes y el relieve, crean una enorme diversidad de microclimas y micro hábitats, lo cual permite atrapar una parte disparmente alta de la precipitación (Toledo, 2006).

Una torre de agua puede tener múltiples funciones, por ejemplo, para los ecosistemas y recursos hídricos (irrigación, suministro industrial o domestico), y su importancia se evidencia cuando se consideran las personas que usan el agua en tierras bajas, pues resulta que 7% de las áreas montañosas del mundo tienen un rol esencial en los recursos hídricos usados por las poblaciones, mientras que otro 37% proporciona un suministro de apoyo importante (Viviroli, *et al*, 2007).

Objetivo:

Comparar el cambio de uso de suelo en dos cuencas del pico de Tancítaro y su efecto en la escorrentía e infiltración hídrica, como indicadores de la disponibilidad de agua.

Objetivos particulares:

Caracterizar el cambio de uso de suelo en la cuenca Tancítaro y en la cuenca La Culebra, de 1974 al 2014.

Calcular los cambios en la escorrentía e infiltración hídrica asociados a los cambios en las cubiertas del suelo

Analizar el impacto de los cambios de las cubiertas del suelo y de sistema hídrico sobre la disponibilidad de agua en las dos cuencas de estudio.

Justificación

El agua es un elemento fundamental para la vida y crucial para el desarrollo de las actividades humanas, pero el panorama respecto al tema del agua es desalentador, tanto en el mundo como en México. En el país los problemas son desabastecimiento, contaminación y gestión del recurso, lo cual termina repercutiendo en la calidad de vida de las personas, al no contar con el agua en la cantidad y calidad suficiente en sus hogares.

La relación entre las cubiertas de la tierra y el ciclo hidrológico es fuerte, ya que distintos elementos de este ciclo dependen del tipo de vegetación del lugar. Así que la alteración de las cubiertas repercute directamente en el recurso hídrico, especialmente al reducir la capacidad del sistema para retener agua y dejarla disponible para el consumo humano.

En el lugar no hay mediciones directas ni del caudal ni la infiltración, por lo que es necesario realizar una estimación de la infiltración, apoyándonos en modelos simples que permitan tener una visualización general de los cambios que han modificado la infiltración del agua.

Conocer la disponibilidad del agua y el cambio de ésta a lo largo del tiempo, es indispensable para tener una buena gestión de los recursos hídricos y evitar graves problemas de escasez en las poblaciones, sobre todo en un lugar con potenciales conflictos de agua debido a la competencia entre el uso agrícola y doméstico, como lo es la zona aguacatera del estado de Michoacán.

Capítulo 2

Zona de estudio

Estratovolcán Pico de Tancítaro

El pico de Tancítaro es la elevación de mayor altitud de Michoacán, presenta un gradiente altitudinal entre 2200 y 3850 msnm, con una superficie aproximada de 60 mil ha y se localiza al oeste de Michoacán, casi en los límites de Jalisco y forma parte de los municipios de Tancítaro, Nuevo Parangaricutiro, Peribán de Ramos y Uruapan (Fuentes y Bocco, 2011).

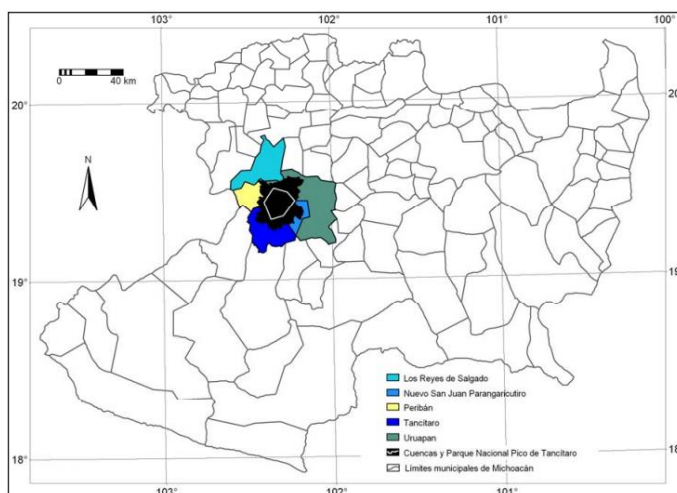


Figura 1. Mapa de localización. Fuente: Tomado de Fuentes, 2011.

La particularidad de esta región se debe a que se combinan tres elementos importantes: un área natural protegida con deterioro evidente, una fuerte presencia de comunidades indígenas forestales y un importante incremento de cultivos frutícolas (sobre todo aguacate) en los últimos años; además, presenta un gradiente altitudinal de 2500 m, una topografía irregular y eventos volcánicos relativamente recientes, lo que resulta en un macizo volcánico, donde dominan la pobreza, etnicidad y una ambigua tenencia de la tierra, con una importante variabilidad ambiental dada por pisos altitudinales y diferentes orientaciones e inclinaciones de sus laderas (Velázquez y Fuentes, 2004).

Clima

Los climas en la zona de estudio siguen un patrón subhúmedo que van de frío a templado, con una temperatura promedio anual que varía dependiendo de la elevación (Velázquez y Fuentes, 2004). Además, los climas responden a un

comportamiento definido por la aparición de las lluvias en verano y la escasez de agua desde noviembre hasta mayo, cuando empiezan de nuevo las precipitaciones; las lluvias son abundantes durante los meses de agosto, septiembre y octubre y oscilan entre 900 mm y 1,200 mm anuales (Fuentes y Bocco, 2003).

Aunado a eso, se han distinguido tres franjas climáticas importantes: una ubicada en la parte baja del Tancítaro de menor precipitación (de menos de 900 mm anuales hasta 1,000 mm) en altitudes comprendidas entre 1,300 y 2,000 msnm; otra entre 3,000 y 3,500 msnm, donde las lluvias son más abundantes, aproximándose a los 1,200 mm de precipitación anual; y una última franja más homogénea climáticamente, pero con un fuerte descenso de la temperatura, en donde la precipitación vuelve a disminuir hasta los 900 mm anuales en lo más alto del Tancítaro (ídem).

Por otro lado, a altitudes menores a 1000 msnm se presentan climas cálido subhúmedos con lluvias en verano, se caracterizan por la presencia de precipitaciones por encima de los 800 milímetros anuales en verano y poca variación de la temperatura. A partir de los 1000 msnm, aproximadamente, se presentan climas del tipo semicálidos subhúmedos con lluvias en verano, con precipitaciones de hasta 1500 milímetros anuales. En altitudes superiores a los 2000 msnm se encuentran los climas templado subhúmedo y templado húmedo con lluvias en verano, donde los rangos de temperatura se ubican entre 12 °C y 18 °C y la precipitación puede llegar a los 1500 milímetros anuales. Desde los 3000 msnm, en las partes más altas del Tancítaro, los climas son semifrío húmedo con verano fresco largo; la temperatura varía de los 5 °C hasta los 12 °C y las precipitaciones promedio se ubican entre 900 y mil milímetros anuales. El último tipo climático es el semifrío subhúmedo con verano fresco largo, diferenciándose del anterior por una menor precipitación, pero manteniendo las demás características (CONANP, 2014).

Relieve y suelos

El Pico de Tancítaro y sus alrededores se encuentran dentro del Cinturón Volcánico Mexicano, son característicos los derrames y productos piroclásticos de composición andesítica, existen además manifestaciones locales aisladas de vulcanismo reciente, como lo sucedido en el volcán Parícutín (Ramírez y Morales, 2009). A simple vista se aprecia un solo bloque montañoso, pero en realidad se trata de una serie de cerros o picos que dificultan el acceso y visibilidad a la cumbre (García, 2001).

Los suelos presentes en la región del Pico de Tancítaro se derivan de la actividad volcánica pasada, aunque existe una gran variedad de tipos y unidades de suelo, predominan aquellos que provienen de substratos volcánicos, por lo que los Andosoles son los más abundantes. En segundo lugar, se encuentran los Regosoles, cuya distribución está vinculada al establecimiento de cenizas

volcánicas y efusiones recientes de material volcánico. El tercer tipo de suelo en importancia es el Luvisol; se le encuentra hacia el sureste. (Velázquez y Fuentes, 2004).

Fauna

El Pico de Tancítaro como área natural protegida (área de protección de flora y fauna) tiene una gran importancia por su ubicación, extensión y por tener importantes especies vegetales y animales (Fuentes, 2003). Ya que esta flora y fauna posee particularidades extraordinarias debido a las características geomorfológicas y climáticas que condicionan y determinan su abundancia y diversidad (Arriaga, *et al*, 2000).

El área del Pico de Tancítaro al presentar diversas elevaciones, ofrece varios tipos de vegetación y clima, en consecuencia, tiene un variado número de especies de flora y fauna, algunas de ellas endémicas (CONANP, 2014); al menos existen dos especies endémicas de plantas y una especie de mamífero (del género *Zygoeomis*), además, aquí se encuentran especies que en otras áreas de Michoacán han desaparecido (Velázquez y Fuentes, 2004).

La fauna está compuesta por venado cola blanca, armadillo, cacomixtle o cacomisel, zorra gris, aves canoras y de presa, así como por diversos reptiles (Ramírez y Morales, 2009). Velázquez y Fuentes (2004) reportan 39 especies de mamíferos, 99 especies de aves. Por otro lado, existen registros de al menos 370 especies de plantas, 38 de anfibios y reptiles, 253 de aves y 90 de mamíferos (Fuentes y Bocco, 2011).

Vegetación

Tanto el relieve como la altitud han permitido el desarrollo de diversos tipos de vegetación de filiación neártica, como lo son el bosque de pino de altura, el de oyamel, el de pino-encino, el de encino, y el mesófilo de montaña. (Velázquez y Fuentes, 2004)

De acuerdo con García Ruiz (2001) los principales tipos de vegetación que se presentan en el pico de Tancítaro son los siguientes:

Bosque de coníferas. El conjunto de bosques de coníferas ocupa cerca del 15% del territorio del país y más de 9/10 de esta superficie corresponde a los de *Pinus* o de *Pinus* y *Quercus*. Les siguen en importancia, en cuanto a extensión, los bosques de *Juniperus* y los de *Abies*, siendo los restantes de distribución restringida y localizada.

Bosque de pinus. La gran mayoría de los pinos mexicanos posee una distribución geográfica restringida al territorio de este país. El Eje Neovolcánico Transversal, que es la cordillera más alta del país, constituye una de las áreas de concentración de pinares. Los representantes de este género constituyen las especies dominantes en los bosques del país, siendo de gran importancia económica en la producción de madera; la resina que de ellos se obtiene es fuente importante de donde se extraen diversos productos.

Bosque de *Abies*. Se presenta en lugares húmedos de cañadas y áreas abiertas, por arriba de los 2450 m de altitud donde comparte su hábitat con otras especies de *Pinus* y *Quercus*, observándose hasta los 3400, en que empieza a ser común la presencia de *Pinus hartwegii* y en áreas abiertas es común el "zacatal". La especie que representa esta formación es *Abies religiosa* llamada localmente "Pinabete", la cual es apreciada por su madera.

Bosque mesófilo de montaña. Esta comunidad vegetal corresponde en México al clima húmedo de altura, y dentro del conjunto de las asociaciones que viven en las zonas montañosas ocupa sitios más húmedos que los típicos de los bosques de *Quercus* y de *Pinus*. El denominador común de casi todos los sitios en que se desarrolla este tipo de vegetación son las frecuentes neblinas y la consiguiente alta humedad atmosférica. El bosque mesófilo de montaña se desarrolla en regiones de relieve accidentado y las laderas de pendiente pronunciada constituyen su hábitat más frecuente. En muchas áreas se halla restringido a cañadas protegidas del viento y de la fuerte insolación. Se desarrolla entre los 2000 y 2600 m de altitud.

Bosque de encino. Son comunidades cuya altura varía entre 2-30 m, alcanzando en ocasiones hasta 50, generalmente son de tipo cerrado, pero pueden variar a abiertos o muy abiertos. Es una de las comunidades vegetales más características de las zonas montañosas de México. Los encinos guardan relaciones complejas con los pinos, con los que comparten afinidades ecológicas generales, siendo los bosques mixtos de *Quercus* y *Pinus* muy frecuentes en el país. También se relacionan con los bosques de *Abies* y con el bosque mesófilo de montaña.

Pastizal. Un tipo de zacatal que representa sin duda un clímax climático es aquel que se desarrolla por encima del límite de la vegetación arbórea sobre las montañas que alcanzan elevación suficiente para ofrecer este tipo de hábitat. Solo las montañas altas del Eje Neovolcánico incluyendo al Tancítaro tienen manchones de este tipo de vegetación. El suelo se deriva de rocas volcánicas, frecuentemente de areniscas (cenizas). Las gramíneas más bien altas (hasta de 1 m) que crecen en amplias macollas son las que imparten una fisonomía particular a esta comunidad vegetal, por lo que se le ha denominado "zacatal" o "páramo de altura", desarrollándose esta comunidad entre los 3000 y los 3800 m, en lugares abiertos del bosque de encino y de coníferas.

García Ruiz (2001) reportó en la zona 108 familias de plantas vasculares agrupadas en 297 géneros con 524 especies; de las que según la NOM-ECOL-059-94, 6 son raras, 2 amenazadas, 2 sujetas a protección especial y 1 está en peligro de extinción; se consideran algunas especies endémicas como la *Tigridia alpestris subs. obtusa* Molseed.

Hidrología

El Pico de Tancítaro es muy importante hidrológicamente hablando, ya que aporta una gran cantidad de agua a la región aguacatera más importante del país y abastece del vital líquido a más de 40 mil habitantes (Fuentes, 2003).

Se encuentra dentro de la cuenca del Balsas, a través de las subcuencas del río Tapalcatepec y Cupatitzio, que es una de las cuencas de mayor relevancia a nivel nacional y estatal, tanto por su extensión como por su significado socio-económico y ambiental (Ramírez y Morales, 2009). Los afluentes al río Tepalcatepec al oeste del área natural protegida son: Apo, Choritiro; al sur y poniente del área existen un sinnúmero de ríos intermitentes que drenan hacia el río Cupatitzio y que son los siguientes: Piedra azul, Las Tinajas, Tancítaro, La Gringa, El Fresnito, Rancho Nuevo, Tiscato, Las Amapolas, La Culebra, Charapondiro entre otros (García, 2001).

Las características hidrológicas en el Tancítaro se definen por la existencia generalizada de corrientes efímeras, siguiéndoles en número los arroyos intermitentes y por último, los arroyos perennes. Las redes de distribución de los ríos son de tipo radial, dendrítica y de redes no estructuradas que son típicas de superficies con lavas muy recientes como las del Paricutín, en donde no se observan cauces definidos (Fuentes y Bocco, 2003).

La oferta de agua superficial del Tancítaro se estima en un volumen de agua cercano a los 43.1 millones de m³ por año, de los cuales 15.3 millones provienen de los manantiales y 27.7 de los ríos; existen 52 manantiales y 7 escurrimientos permanentes en la zona (Fuentes y Bocco, 2011).

Cuencas hidrológicas del pico de Tancítaro

Este estudio parte de la división de cuencas hidrológicas del pico de Tancítaro realizada por Fuentes (2004). Esta división comprende 16 cuencas hidrológicas, cuya configuración radial centrífuga es típica de las zonas volcánicas, es decir, las cabeceras se irradian desde el centro del Pico de Tancítaro, y se abren en abanico hacia las partes más bajas, en lo que son sus bocas o desagües. El límite inferior de salida de las cuencas está formado bajo un criterio geomorfológico, correspondiendo a las zonas de piedemonte inferior del estratovolcán, mismo que coincide más o menos con las cotas de 1,300 a 1,500 msnm.

Tabla 1. Características morfométricas básicas de las cuencas del Tancítaro.

	P (Km)	LCP (Km)	AC (Km)	EM (msnm)	Á (Km ²)	TR	AM	AMx	D
Apo	30.5	11.4	5.4	2318.8	29.68	Pequeña	1780	3700	1920
Chondo	42.3	13.2	4.4	2609.8	45.55	Pequeña	1580	3840	2260
Chuanito	24.3	11.0	2.9	1782.3	20.68	Muy pequeña	1460	2200	740
Rodada	34.3	14.2	4.6	2277.9	33.84	Pequeña	1540	3760	2220
Cutio	28.4	11.8	5.0	1892.1	31.67	Pequeña	1600	3200	1600
El Chivo	22.6	9.9	3.8	2005.1	21.20	Muy pequeña	1960	2600	640
Hoyicazuela	25.6	10.7	2.9	2421.3	20.33	Muy pequeña	1820	3600	1780
Huandiestacato	57.1	12.1	5.5	2339.5	60.78	Mediana	1940	3200	1260
La Culebra	45.0	15.9	9.8	2453.6	102.66	Grande	1500	3760	2260
La Gringa	20.0	8.5	2.8	2084.4	12.48	Muy pequeña	1940	2600	660
Lavas del Paricutín	30.1	6.9	5.4	2410.6	25.51	Muy pequeña	2200	2800	600
Nureto	67.9	18.9	7.3	2652.2	84.76	Grande	2300	3500	1200
San Francisco	34.6	14.1	4.5	2473.5	41.80	Pequeña	1800	3600	1800
Tancítaro	42.3	17.4	5.9	2189.5	66.07	Mediana	1380	3840	2460
acándaro	34.8	12.0	6.5	2224.0	51.16	Mediana	1500	3040	1540
Zirimóndiro	34.4	14.3	3.5	2266.8	28.81	Pequeña	1900	3700	1800

(P) Perímetro, (LCP) Longitud del cauce principal, (AC) Ancho de la cuenca, (EM) Elevación media, (A) Área, (TR) Tamaño relativo, (AM) Altitud mínima, (AMx) Altitud máxima y (D) Desnivel.

Fuente: Tomado de Fuentes, 2004.

De las 16 cuencas que conforman el Pico de Tancítaro, en este trabajo se tomaron dos, se trata de la cuenca de La Culebra y la cuenca Tancítaro, se escogió la cuenca La Culebra ya que es la más grande y parte de su área se encuentra dentro del territorio de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, esta comunidad maneja de forma sustentable los bosques pertenecientes a su territorio. La cuenca Tancítaro es una cuenca mediana, con un poco más de la mitad de tamaño que La Culebra, pero con una fuerte presión sobre sus recursos, debido a la influencia de la población de Tancítaro, que es la cabecera municipal.

Cuenca La culebra

Es una de las tres cuencas más importantes tanto en tamaño como en su aporte hídrico a la región. Su nombre lo toma de la barranca del mismo nombre donde escurre el cauce principal, el cual es permanente y tiene caudales superiores a los 250 l/seg en la época de estiaje. Es la cuenca más grande de la zona con un tamaño de 102 km². Posee una gran variación altitudinal, ya que inicia prácticamente en lo más alto del Tancítaro y termina en lo más bajo, lo que condiciona el que tenga la mayor cantidad de ecosistemas de todas las cuencas, mismos que van desde los

bosques fríos de pino hasta los bosques mesófilos de montaña y zonas de transición a selva baja caducifolia (Fuentes y Bocco, 2011).

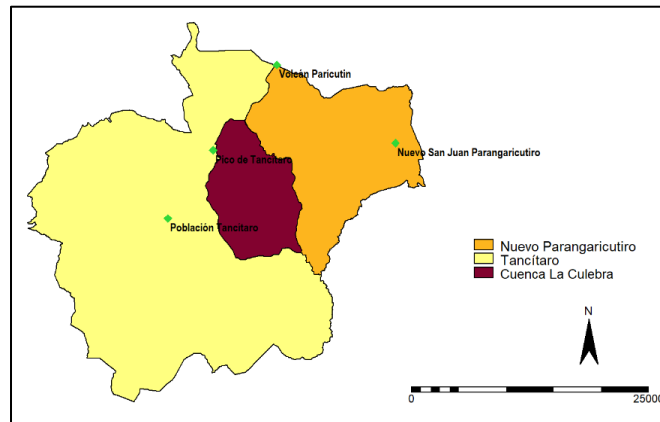


Figura 2. Imagen de localización de la cuenca La Culebra

Cuenca Tancitaro

La cuenca de Tancitaro es una de las cuencas más importantes del pico de Tancitaro debido a que en ella se localiza la población de Tancitaro y cabecera municipal. Se localiza al oeste-suroeste del pico y tiene un tamaño medio con 66.07 km². Así mismo, es una cuenca cuya característica principal es la alteración que ha sufrido su cauce principal que debería ser permanente y que no lo es debido a que el aprovechamiento total de sus aguas no permite el escurrimiento hasta la salida de la cuenca (Fuentes y Bocco, 2011).

La población de Tancitaro tiene una población de 6,747 habitantes, según el censo de 2010, con un grado medio de marginación.

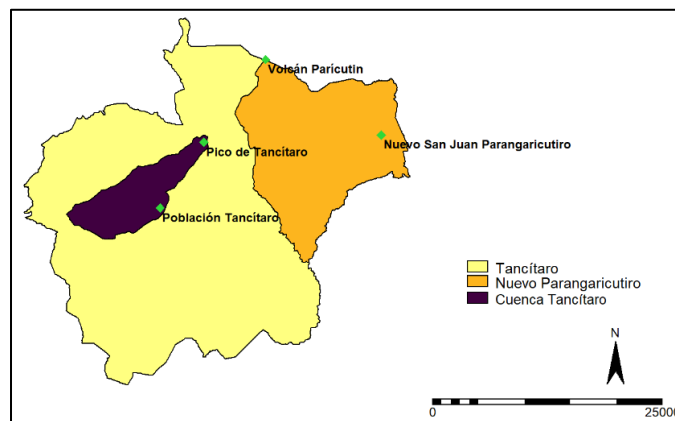


Figura 3. Imagen de localización de la cuenca Tancitaro

Capítulo 3

Marco metodológico.

Clasificación de las cubiertas y uso de suelo.

Se denomina fotointerpretación al examen de imágenes fotográficas aéreas para deducir que son los objetos que aparecen en ellas, apoyándose en las características e información directas observables e indirectas deducibles por extensión lo mismo se puede decir de las imágenes satelitales, radar o cualquier imagen obtenida a través de la teledetección (IGM-CCCG, s.f).

Para la interpretación de imágenes se usan diversos criterios que permiten extraer el máximo de información posible de la imagen, dichos criterios se derivan de las características físicas de las fotografías o imágenes mismas, como el tono y la textura, o se derivan de las características de los rasgos u objetos reales cuyas imágenes aparecen en ellas, tales como la forma, el tamaño, la sombra o el contexto (Guerra, 2003).

Tono y color. La percepción de color es un importante elemento para el reconocimiento de los objetos, los tonos de los objetos en la imagen corresponden a nuestra percepción de aquellos objetos que están en la naturaleza. (Torres Cossío, 1967). El tono depende no solo de la cantidad de luz absorbida, sino de la condición material y textura de dichos objetos. (Guerra Peña, 2003)

Textura. La textura en fotografías aéreas es creada por la repetición de tonos en grupos de objetos los cuales son muy pequeños para ser reconocidos individualmente, es decir, en escala grande los árboles pueden ser vistos individualmente, a pesar de esto, sus hojas y muchos otros detalles no pueden ser distinguidos separadamente, pero contribuyen a dar la textura para reconocerlos (Gutiérrez Palacios, 2005).

Medida. La medida de un objeto es uno de los aspectos más usados en su identificación, por la medición de un objeto conocido, sobre una foto aérea, el intérprete puede discriminarlos de otros grupos de una identificación similar (Torres Cossío, 1967).

Forma: La forma se refiere al aspecto de un objeto observado desde un punto de vista vertical (Torres Cossío, 1967). Las formas con apariencia regular corresponden a objetos que se deben a la actividad humana en su gran mayoría, mientras que las imágenes irregulares y desordenadas en apariencia pertenecen a rasgos que son naturales (Guerra, 2003).

Sombras: Las sombras constituyen un caso especial, donde la tonalidad puede fluctuar en toda la gama de grises, los efectos de las sombras ayudan a crear la ilusión de profundidad y con frecuencia acentúan las irregularidades de la superficie del terreno que de otra manera pasarían desapercibidas o serían imperceptibles (Gutiérrez Palacios, 2005). La presencia de sombras en las fotos aéreas algunas veces ayuda al intérprete para mostrarle los perfiles representativos de los objetos que le interesan (Torres Cossío, 1967).

Contexto: Determinados objetos carecen, en ocasiones, de caracteres propios, lo suficientemente relevantes como para permitir su inmediata identificación, en cuyo caso se hace preciso relacionarlos con los demás rasgos u objetos asociados que los circunden (Guerra, 2003).

Interpretación interdependiente

El método de interpretación interdependiente indica que se interprete una primera imagen, marcando en su totalidad todos los polígonos de la primera fecha, estos polígonos son utilizados como base para la interpretación de las siguientes fechas, únicamente modificando los límites en los cuales se detecten cambios, de esta manera se asegura una coherencia temática y espacial entre las clasificaciones de las series de imágenes que cubre el área de estudio, ya que todas las líneas se corresponden perfectamente, excepto cuando se ha detectado un cambio (FAO, 1996).

De acuerdo con este enfoque, cada límite de clase se basa en ambas imágenes, eliminando así cualquier subjetividad relativa en la delineación de clase entre las dos imágenes, en consecuencia, las áreas cambiadas se tratan como otras clases interpretadas y no derivan de la diferencia entre dos interpretaciones independientes, de hecho, la distinción entre las características y variaciones de la cubierta terrestre se realiza mejor cuando las dos imágenes se comparan en cada etapa de la interpretación (FAO, 1996).

Balance hídrico

La disponibilidad de recursos hídricos puede ser evaluada usando las técnicas del balance hídrico, ya que con este es posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre (Sokolov y Chapman, 1981).

El balance hídrico de un área durante un periodo de tiempo representa la forma en que la precipitación es dividida entre los procesos de evapotranspiración y

escorrentía, teniendo en cuenta los cambios en el almacenamiento del agua (Thomas y Goudie, 2000). Es decir, es la forma en la que se representa en términos cuantitativos el ciclo hidrológico (Gupta, 2008).

El estudio del balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, este principio establece que para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada. En la ecuación del balance hídrico la entrada está dada por la precipitación recibida en la superficie del suelo, y en las salidas se incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea; cuando las entradas superan a las salidas, el volumen de agua almacenada aumenta y cuando ocurre lo contrario, el agua almacenada disminuye (Sokolov y Chapman, 1981).

La ecuación del balance hídrico es la siguiente:

$$P-EV-Q-\Delta S=0$$

Donde:

P= precipitación

EV= evapotranspiración

Q= escorrentía

ΔS = almacenamiento

El balance hídrico puede ser evaluado por mediciones de campo directas, o puede ser calculado haciendo suposiciones de simplificación acerca del papel y operación de los diferentes parámetros que lo componen, y es posible calcularlo para cualquier tamaño de área, aunque es más comúnmente aplicado a escala de cuenca (Thomas y Goudie, 2000).

La gran heterogeneidad natural y problemas de escala hacen difícil hacer una descripción realista de los procesos hidrológicos, una alternativa para acercarse a estos procesos es la utilización de modelos; estos modelos pueden sintetizar la distribución espacial de las lluvias, usos del suelo e información topográfica para producir predicciones del comportamiento de los distintos parámetros hidrológicos (Loaiza y Valentijn, 2011).

Precipitación

La precipitación, en gran parte en forma de lluvia y nieve, es la fuente de humedad que llega a la tierra, para la ecuación de balance hídrico es un parámetro clave, ya que es por lo general la única entrada de agua al sistema (Gupta, 2008).

Evapotranspiración

La evaporación es el agua vaporizada hacia la atmosfera desde el agua libre de la superficie y el suelo, y la transpiración es el agua absorbida por las plantas y los cultivos y eventualmente liberada a la atmosfera (Gupta, 2008).

El método de Thornthwaite estima la evapotranspiración, está basado en la determinación de la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes. El método es muy empleado en hidrología y en la estimación del balance hídrico para climatología e hidrología de cuencas.

Primero se calcula el índice de calor mensual (i) según la fórmula:

$$i=(t/5)^{1.514}$$

Luego se obtiene el índice de calor anual (I) como la suma de los doce valores del índice de calor mensual para meses teóricos de 30 días y 12 horas diarias de sol. A partir de estos datos propone la siguiente fórmula:

$$ETP=1.6(10t/I)^a$$

Donde:

ETP= evapotranspiración potencial mensual no corregida

t= temperatura media mensual en °C

I= índice de calor anual

a= función compleja de I igual a $675 \cdot 10^{-9} I^3 - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 1.972 \cdot 10^{-5} I + 0.49239^3$

Para el cálculo de la evapotranspiración de un mes determinado será preciso corregir la ETP sin ajustar (e) mediante un coeficiente que tenga en cuenta el número de días del mes y horas de luz de cada día, en función de la latitud. Para lo cual se introduce la siguiente fórmula:

$$ETP_{Tho} = e * L$$

Donde:

e= evapotranspiración mensual sin ajustar en mm

L= factor de corrección del número de días de mes (N_d_i) y la duración astronómica del día N_i

$$L = N_{d_i} / 30 * N_i / 12$$

Método de número de curva

La escorrentía se estimó a través del método de número de curva. Este método fue desarrollado en 1954 por el servicio de conservación de suelos (Soil Conservation Service) de Estados Unidos, y rápidamente se convirtió en una práctica hidrológica frecuentemente utilizada, con diversas aplicaciones en diversos campos y varios países (Ponce y Hawkins, 1996). La amplia difusión de la que ha sido objeto radica en su simplicidad, tanto en la obtención de los datos físicos necesarios, como en su facilidad de usarse en diferentes ámbitos (López Alonso, 2001).

El método de número de curva (NC) es un modelo conceptual de pérdidas de precipitación, cuyo objetivo es calcular la escorrentía generada por una tormenta, toma en cuenta pérdidas como el agua retenida en depresiones, el agua retenida por la vegetación, el agua evaporada y el agua que se infiltra (Lavao y Corredor, 2014; López Alonso, 2001).

Las hipótesis del modelo son dos:

- La escorrentía comienza cuando se satisface un umbral de pérdidas iniciales, consistiendo éstas principalmente en interceptación, infiltración previa a la escorrentía y almacenamiento en depresiones del terreno.
- Una vez superado el umbral de escorrentía la relación entre la retención efectiva de la precipitación y la retención potencial, es igual a la relación entre la escorrentía efectiva y la escorrentía potencial (López Alonso, 2001).

La metodología del NC considera como variables en su determinación:

- La precipitación, representada en este caso por la precipitación para un período de tiempo previamente seleccionado.
- La interrelación tipo de suelo -uso de suelo.
- La condición de humedad antecedente; de acuerdo con estas variables se fija un número de curva (NC) que representa tal interrelación (Lavao y Corredor, 2014).

Según este procedimiento, la escorrentía directa (Q) o precipitación efectiva, se expresa mediante la ecuación:

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

Donde:

Q: Es la escorrentía directa o precipitación efectiva.

P: Es la precipitación considerada.

S: Pérdida de escorrentía por infiltración, interceptación y almacenamiento superficial.

Esta ecuación tiene tan sólo un parámetro, S, que se relaciona con el parámetro adimensional NC, con la siguiente ecuación:

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

Donde:

NC: Número de Curva

S: Pérdida por infiltración, interceptación y almacenamiento superficial.

Para la determinación de NC en cuencas no aforadas se suministran tablas en las que se dan números, para cada complejo uso del terreno-suelo-vegetación, tabulados entre 0 y 100. Un número de curva de valor 100 representa una condición nula de retención potencial ($S=0$), esto es, una cuenca totalmente impermeable. Contrariamente, un número de curva de valor 0 corresponde a una retención potencial ilimitada ($S=\infty$), esto es, una cuenca capaz de retener toda la precipitación. Si bien existen diferentes tablas, en la mayoría los factores a considerar son: cubierta vegetal, uso de suelo y tratamiento, condiciones hidrológicas de la superficie de escurrimiento y tipo de suelo. (López Alonso, 2001).

Parámetros del modelo.

- Condición de humedad antecedente

Un factor importante a tener en cuenta en estas curvas son las condiciones antecedentes de humedad, las cuales se agrupan en tres condiciones básicas:

Condición I: Suelo seco. Los suelos en la cuenca están secos, pero no hasta el punto de marchitamiento, cuando se aran o se cultivan bien.

Condición II: Suelo medio; Asociado a crecidas anuales o promedios. Los suelos en la cuenca, se encuentran en estado de humedad normal.

Condición III: Suelo húmedo. Los suelos en la cuenca se encuentran en estado muy húmedo.

Los números de curva se aplican para condiciones antecedentes de humedad normales.

- Tipo de suelo hidrológico

La determinación del tipo de suelo hidrológico se establece en términos de dos variables principales:

- El tipo de suelo mediante el cual se fijan las condiciones de infiltración.
- La cobertura vegetal, según la cual las plantas también ejercen una fuerte influencia en la escorrentía directa.

Esta interacción permite determinar en forma empírica una primera aproximación al valor del NC para las condiciones hidrológicas promedio a nivel local.

En función del tipo de suelo se definen cuatro grupos:

Grupo A: Suelos con bajo potencial de escorrentía. Incluye los suelos que presentan mayor permeabilidad, cuya tasa de infiltración, para las capas cercanas a la superficie del suelo, resulta mayor a los 144mm/h, incluso cuando se encuentran totalmente humedecidos. Comprenden los terrenos profundos sueltos con predominio de arena o grava y con muy poco limo o arcilla.

Grupo B: Suelos con tasa de infiltración moderada, que va de los 36.1 mm/h a los 144 mm/h, esto para las capas superiores. Comprenden los terrenos arenosos menos profundos que los del grupo A, otros de textura franco-arenosa de mediana profundidad y los francos profundos.

Grupo C: Suelos con una tasa baja de infiltración para las capas próximas a la superficie del suelo (3.6 mm/h-36.1 mm/h), presentan un estrato impermeable que dificulta la infiltración o su textura es franco-arcillosa o arcillosa.

Grupo D: Suelos con una tasa de infiltración muy baja, menor de 3.6 mm/h. Incluye los suelos que presentan gran impermeabilidad, tales como los terrenos muy arcillosos profundos, los terrenos que presentan en la superficie o cerca de la misma una capa de arcilla muy impermeable y aquellos otros con un subsuelo muy impermeable próximo a la superficie.

- Precipitación

Convencionalmente en esta metodología se utiliza el valor de precipitación de corta duración, es decir tormentas, con el objetivo de evaluar crecientes o caudales máximos para el diseño de diferente tipo de obras hidráulicas. (Lavao y Corredor, 2014).

Si bien el método ha sido usado ampliamente, se debe tomar a consideración que fue en origen desarrollado utilizando principalmente datos regionales del medio oeste estadounidense, por lo que su extensión mundial requiere estudios locales que adapten las tablas originales de NC; además, el método no contempla los

efectos que sobre la generación de escorrentía tienen la variabilidad temporal de la precipitación, la infiltración u otros mecanismos de pérdidas (López Alonso, 2001).

Infiltración

La cantidad de agua disponible durante todo un año, incluyendo la temporada de secas, está relacionada con el agua que el sistema puede almacenar durante el periodo de lluvias. El agua almacenada en las cuencas hidrográficas comprende: el agua superficial, que se acumula en microdepressiones o en ríos, lagos, embalses, pantanos, etc.; el agua subsuperficial acumulada en el suelo y en la zona no saturada, y el agua subterránea (Sokolov y Chapman, 1981).

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo, a través de la superficie de la tierra, y queda retenida por ella o alcanza un nivel acuífero incrementando el volumen acumulado anteriormente, por lo que aumenta el agua almacenada; la infiltración de la lluvia y el agua superficial es controlada por diversos factores, incluida la profundidad del suelo y la geomorfología, así como las propiedades hidráulicas del suelo y las propiedades climáticas y de la precipitación (PHI, 2016).

Parte del agua que se infiltra, permanece en las capas más superficiales del suelo y puede volver a entrar a un curso de agua debido a que se filtra hacia el mismo, esta es la razón por la cual los ríos y arroyos pueden tener agua en el periodo de secas; otra porción de la precipitación puede infiltrarse a mayor profundidad y pasa a formar parte del agua subterránea, recargando así los acuíferos subterráneos (PHI, 2016).

Metodología

Cambio de uso de suelo

En el presente trabajo, primero se interpretaron imágenes satelitales del año 2014 a una escala de 1:20000 obtenidas a través de Google Earth, en las cuales se digitalizaron los polígonos de las diferentes cubiertas usando el programa. La clasificación que se usó fue bosque de abeto, bosque de pino-encino, bosque de pino hartwegii, bosque de abies y hartwegii, plantaciones de árboles, matorral, pasto de altura, pasto natural e inducido, cultivos permanentes, cultivos de temporal, cenizas y asentamientos humanos. Los polígonos resultantes de esta interpretación

se usaron como base para trabajar con las fotografías aéreas de los años 2000 y 1974.

Posteriormente se obtuvieron los procesos de cambio ocurridos en las cuencas, en cuestión de deforestación, degradación y recuperación.

El paisaje puede concebirse como un mosaico de usos y cubiertas del suelo que se encuentran en un proceso de cambio desde y hacia las diferentes categorías de uso. La forma de capturar analíticamente la dinámica del mosaico completo de usos y coberturas del suelo es a través de las matrices de transición (Bocco, *et al*, 2001). Se obtuvieron las matrices de los años 2014-2000, 2000-1974 y 2014-1974.

También se calculó la tasa de cambio de cada clase de cubierta del suelo con la siguiente ecuación:

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

Donde:

S_n = tasa de cambio (para expresar en %, multiplicar por 100)

S_1 = superficie forestal, al inicio del periodo

S_2 = superficie forestal, al final del periodo

Infiltración y escorrentía potenciales

Precipitación

En la zona de estudio la precipitación tiene un rango de 911 mm/m² a 1135 mm/m², diferenciado por estratos, de la misma manera que lo hace el clima y la temperatura, la cual va de 7.5 °C (en las partes altas) hasta los 21.3°C.

Evapotranspiración potencial

Se utilizó el método de Thornthwaite para estimar la evapotranspiración, se usó la temperatura media mensual y la duración astronómica del día, sacada de https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es.

Se calculó el índice de calor mensual (i), para cada mes con la fórmula:

$$i = (t/5)^{1.514}$$

Luego se obtuvo el índice de calor anual (I) sumando los doce valores del índice de calor mensual. Después se obtiene una evapotranspiración potencial mensual no corregida con la siguiente fórmula:

$$ETP=1.6(10t/I)^a$$

Donde:

ETP= evapotranspiración potencial mensual no corregida

t= temperatura media mensual en °C

I= índice de calor anual

a= función compleja de I igual a $675 \cdot 10^{-9} I^3 - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 1.972 \cdot 10^{-5} I + 0.49239^3$

Luego se obtiene un factor de corrección L con el del número de días de mes (N_d) y la duración astronómica del día N.

$$L= N_{d_i}/30 * N_i/12$$

De ahí se calculó la evapotranspiración de cada mes usando la siguiente fórmula:

$$ETP_{Th0}= e * L$$

Donde:

e= evapotranspiración mensual sin ajustar en mm

L= factor de corrección

Finalmente se suman todas las evapotranspiraciones mensuales para tener una evapotranspiración anual.

Estimación de la escorrentía potencial

El método de número de curva relaciona el uso de suelo, con el tipo de suelo y la precipitación, por lo que dependiendo de cómo se configure el terreno, se obtienen diversos números de curva, en este caso para cada una de las cuencas, es decir, en Tancítaro y La Culebra. Se estimaron los números de curva para ambas cuencas en tres fechas distintas (1974, 2000 y 2014). El único parámetro que cambia en el tiempo es el uso de suelo por tanto los cambios ocurridos en la escorrentía dependerán de los cambios en el uso de suelo y no por otros factores.

El NC se obtuvo de la tabla de Domínguez Mora, *et al* (2008), ya que los usos de suelo y vegetación están adaptados a los que utiliza INEGI para el país.

Tabla 2. Tabla de asignación de número de curva

USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (INEGI)		GRUPO HIDROLÓGICO			
		A	B	C	D
AGRICULTURA (de humedad, de riego, de temporal)	Condición hidrológica mala	72	81	88	91
	Condición hidrológica regular	67	76	83	86
	Condición hidrológica buena	62	71	78	81
ÁREA SIN VEGETACIÓN APARENTE		77	86	91	94
ASENTAMIENTO HUMANO	Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc	82	88	91	93
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
	Residencial 50 % ó más área impermeable	77	85	90	92
	Residencial 50 % ó menos área impermeable	61	75	83	87
	Áreas comerciales de negocios (85 % impermeables)	89	92	94	95
	Districtos industriales (72 % impermeables)	81	88	91	93
	Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc	98	98	98	98
	Calles y carreteras (pavimentados con cunetas y alcantarillas)	98	98	98	98
	Calles y carreteras de grava	76	85	89	91
	Calles y carreteras de tierra	72	82	87	89
BOSQUE (cultivado, de encino, encino-pino, oyamel, pino, tascate, mesófilo de montaña)	Condición hidrológica mala	45	66	77	83
	Condición hidrológica regular	36	60	73	79
	Condición hidrológica buena	25	55	70	77
CARDONAL		54	71	80	89
CHAPARRAL (ARBUSTOS)		20	48	65	73
CUERPO DE AGUA		100	100	100	100
EROSIÓN		68	79	86	89
MANGLAR		100	100	100	100
MATORRAL (con izotes, con rosetófilos acaules, craticaula, desértico micrófilo, desértico rosetófilo, espinoso, inermes, subinermes, subtropical)	Condición hidrológica mala	48	67	77	83
	Condición hidrológica regular	34	58	71	78
	Condición hidrológica buena	20	48	65	73
MEZQUITAL		68	79	86	92
NOPALERA		39	61	74	84
PALMAR		45	66	77	83
PASTIZAL (cultivado, halófilo, inducido, natural, natural-huizachal)	Condición hidrológica mala	68	79	86	89
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
PLANTACIÓN FORESTAL	Condición hidrológica mala	55	73	82	86
	Condición hidrológica regular	44	65	76	82
	Condición hidrológica buena	32	58	72	79
PRADERA DE ALTA MONTAÑA		30	58	71	78
SABANA		45	66	77	83
SELVA (baja caducifolia, baja caducifolia y subcaducifolia, baja espinosa, mediana subcaducifolia)		45	66	77	83
TULAR		68	79	86	92
VEGETACIÓN HALÓFILA		68	79	100	100
VEGETACIÓN SECUNDARIA		68	79	86	89

Cada mapa de cubiertas y vegetación de los años 1974, 2000 y 2014 se reclasifico de tal manera que las categorías coincidieran con las usadas en la tabla.

Para el tipo de suelo se usó un mapa suelos, con la clasificación de la FAO, este se reclasifico en grupos de suelo, quedando grupo A, B o C.

Los mapas reclasificados se cruzaron y a este mapa nuevo se le asigno el número de curva indicado por la tabla de número de curva, en condiciones normales de humedad. También se obtuvo el número de curva en condiciones de mucha humedad, para ajustar el número de curva a la pendiente.

Se hizo un ajuste del NC con la pendiente, ya que esta influye en la generación de la escorrentía, pues las pendientes empinadas incrementan la escorrentía, a causa de reducir la abstracción inicial, reducir la infiltración y reducir el tiempo de concentración del flujo (Ajmal, *et al*, 2016). Para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$NC_{IIa} = \left(\frac{NC_{III} - NC_{II}}{3} \right) (1 - 2e^{-13.86\alpha}) + NC_{II}$$

Donde:

NC_{IIa}= Número de curva ajustado

NC_{III}= Número de curva en condiciones húmedas

NC_{II}=Número de curva en condiciones normales

α = pendiente

El número de curva ajustado se usó para obtener el parámetro S, que se relaciona con el parámetro adimensional NC, con la siguiente ecuación:

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

Donde:

NC: Número de Curva

S: Pérdida por infiltración, intercepción y almacenamiento superficial.

Con este parámetro S y la precipitación, la escorrentía se estimó mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

Q: Es la escorrentía directa o precipitación efectiva.

P: Es la precipitación considerada.

S: Pérdida de escorrentía por infiltración, intercepción y almacenamiento superficial.

El escurrimiento se clasificó en 5 clases de acuerdo a la cantidad de agua que corre en distintas áreas de las cuencas, lo que permite visualizar las áreas donde hay más escurrimiento o donde hay menos.

- Muy bajo – menor a 584.3 mm/m²
- Bajo – entre 584.4 y 708.9 mm/m²
- Medio – entre 709 y 833.5 mm/m²
- Alto – entre 833.6 y 958.1 mm/m²
- Muy alto – mayor a 958.2 mm/m²

Estimación de la infiltración potencial

El cambio en la disponibilidad se estimó restando la evapotranspiración y la escorrentía a la precipitación, mediante el método de balance hídrico, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$I = P - EVT - Q$$

Donde:

I= infiltración

P= precipitación

EVT= evapotranspiración

Q= escorrentía

Este cálculo se realizó para cada una de las tres fechas (1974, 2000 y 2014), tanto para la cuenca Tancítaro, como para la cuenca La Culebra.

La infiltración se clasificó en 5 clases de la siguiente manera:

- Muy baja – menor a 25.1 mm/m²
- Baja – entre 25.2 y 125.7 mm/m²
- Media – entre 125.8 y 226.3 mm/m²
- Alta – entre 226.4 y 326.9 mm/m²
- Muy alta – menor a 427.6 mm/m²

Finalmente se hizo una correlación simple con las áreas de las cubiertas obtenidas, y la escorrentía e infiltración estimadas.

Capítulo 4

Resultados

Los resultados se presentan en dos grandes apartados, el primero es lo relacionado con el cambio de uso de suelo, lo que abarca las cubiertas de las tres fechas, 1974, 200 y 2014, los cambios generales en cuanto a deforestación, degradación y restauración, las matrices de cambio y la tasa de cambio anual. El segundo apartado aborda los aspectos hidrológicos, que son el escurrimiento y la infiltración. Se muestran los resultados del escurrimiento, obtenido por el método de número de curva, luego se dan los resultados de la infiltración, estimada con la fórmula de balance hídrico. En ambos apartados, el análisis se aborda para el área completa, que son las dos cuencas en su conjunto, luego para la cuenca Tancitaro y finalmente para la cuenca La Culebra, en tres fechas distintas, 1974, 2000 y 2014.

Cambio de uso de suelo

Matriz de confusión

Se hicieron 31 puntos de verificación en campo, de todas las clases de cubiertas, excepto del bosque de abies y hartwegii. Se tuvo una exactitud media de 82.65%, una fiabilidad promedio de 89.25% y una precisión general de 83.87%. Las cubiertas con menor precisión fueron la de cultivos de temporal y el bosque de abeto, los errores en esta cubierta se dieron en la transición hacia otros tipos de bosque.

Tabla 3. Matriz de error

		Puntos de verificación											ACCURACY	
		Asentamientos humanos	Bosque de abeto	Bosque de abies y hartwegii	Bosque de pino hartwegii	Bosque de pino-encino	Cenizas	Cultivos de temporal	Cultivos permanentes	Matorrales	Pasto natural o inducido	Plantaciones		UNCLASSIFIED
Cubiertas 2014	Asentamientos humanos	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	Bosque de abeto	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0.75
	Bosque de abies y hartwegii	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bosque de pino hartwegii	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	Bosque de pino-encino	0	0	0	0	7	0	0	1	0	0	0	0	0.88
	Cenizas	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
	Cultivos de temporal	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0.67
	Cultivos permanentes	0	0	0	0	0	0	0	4	0	1	0	0	0.8
	Matorrales	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	Pasto natural o inducido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1
	Plantaciones de árboles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	RELIABILITY	1	0.75	?	1	0.88	1	1	0.8	1	0.5	1		

Área completa (Cuencas Tancítaro y La Culebra)

Cubiertas y usos del suelo

En 1974 la cubierta de suelo dominante era el bosque de pino-encino (7,742 ha), después se encuentran los cultivos de temporal (5,412 ha), seguidos del bosque de pino hartwegii (1,340 ha), matorrales (860 ha), bosque de abeto (802 ha), pasto natural o inducido (307 ha), cultivos permanentes (293 ha), finalmente están los asentamientos humanos (101 ha), cenizas (14 ha) y pasto de altura (6 ha).

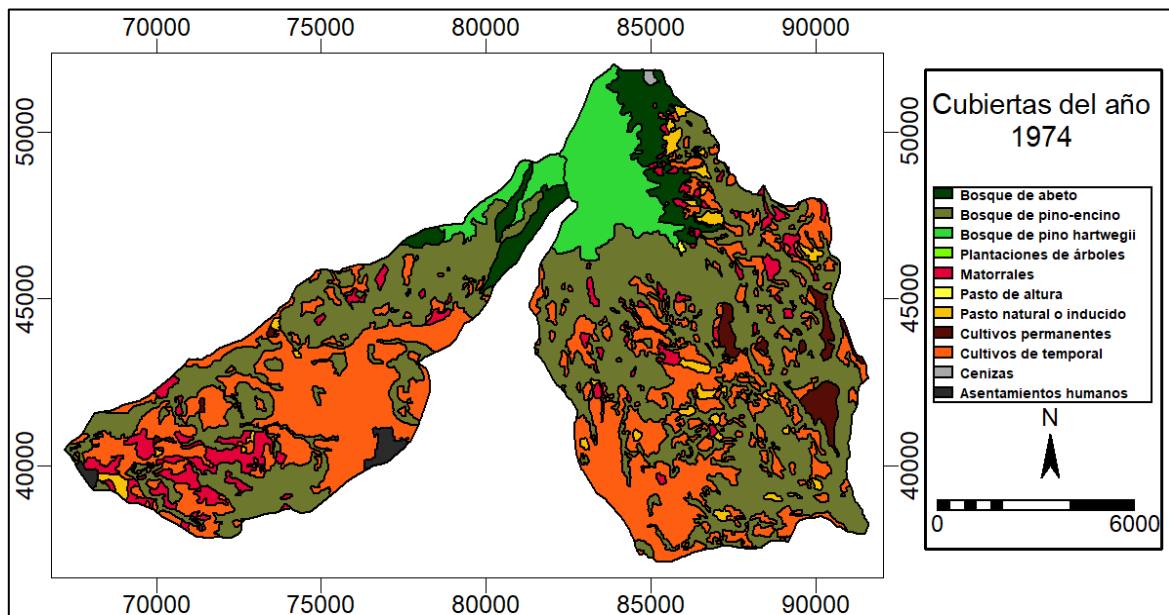
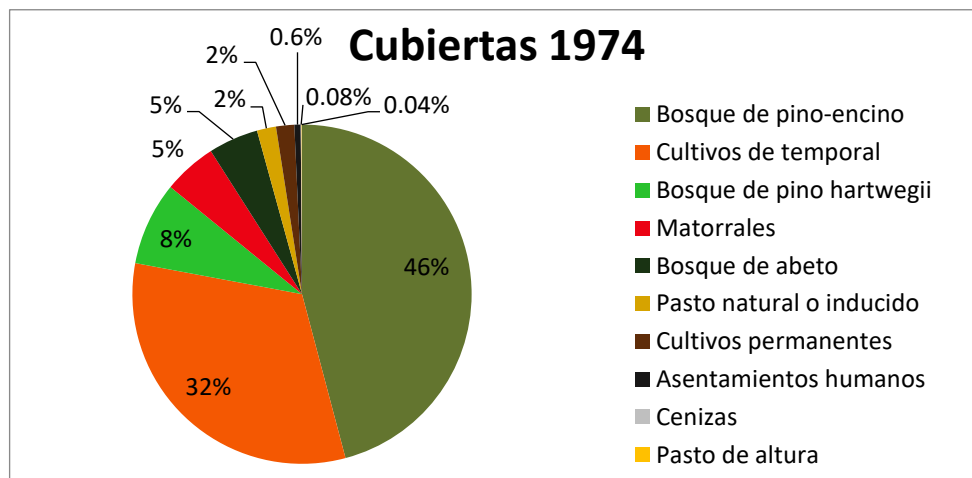


Figura 4. Mapa de cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra del año 1974.



Gráfica 1. Porcentaje de cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra del año 1974.

En el 2000 las cubiertas de suelo dominantes eran el bosque de pino-encino (7468 ha) y los cultivos permanentes (4947 ha), seguidos de cultivos de temporal (1160 ha), bosque de pino hartwegii (1128 ha), bosque de abeto (972 ha), matorrales (724 ha), pasto natural o inducido (228 ha), finalmente están los asentamientos humanos (143 ha), bosque de abies y hartwegii (96 ha), cenizas (10 ha) y pasto de altura (1 ha).

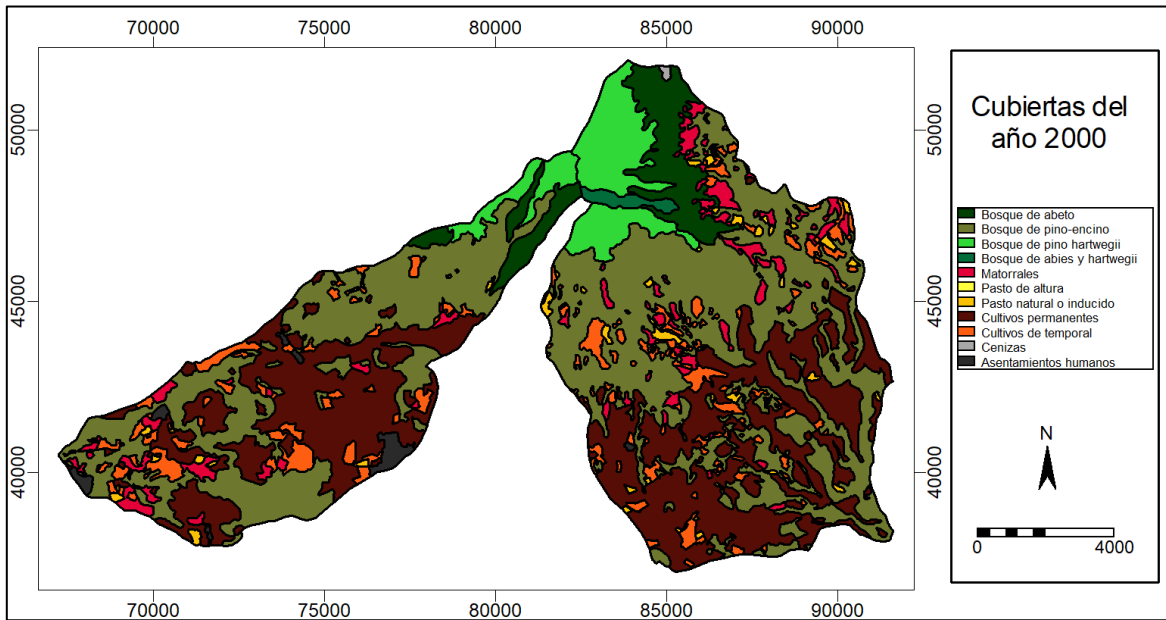
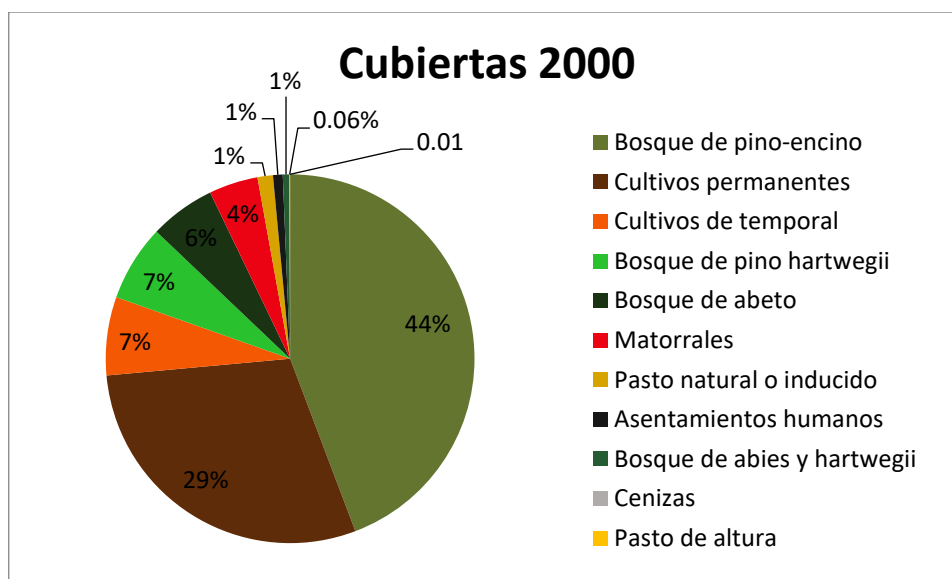


Figura 5. Mapa de cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra del año 2000.



Gráfica 2. Porcentaje de cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra del año 2000.

En el 2014 las cubiertas de suelo dominantes fueron los cultivos permanentes (6883 ha) y bosque de pino-encino (6481 ha), seguidos de bosque de pino hartwegii (1114 ha), bosque de abeto (942 ha), matorrales (480 ha), cultivos de temporal (435 ha), asentamientos humanos (219 ha), pasto natural o inducido (169 ha), finalmente está el bosque de abies y hartwegii (111 ha), plantaciones de árboles (37 ha) y cenizas (7 ha).

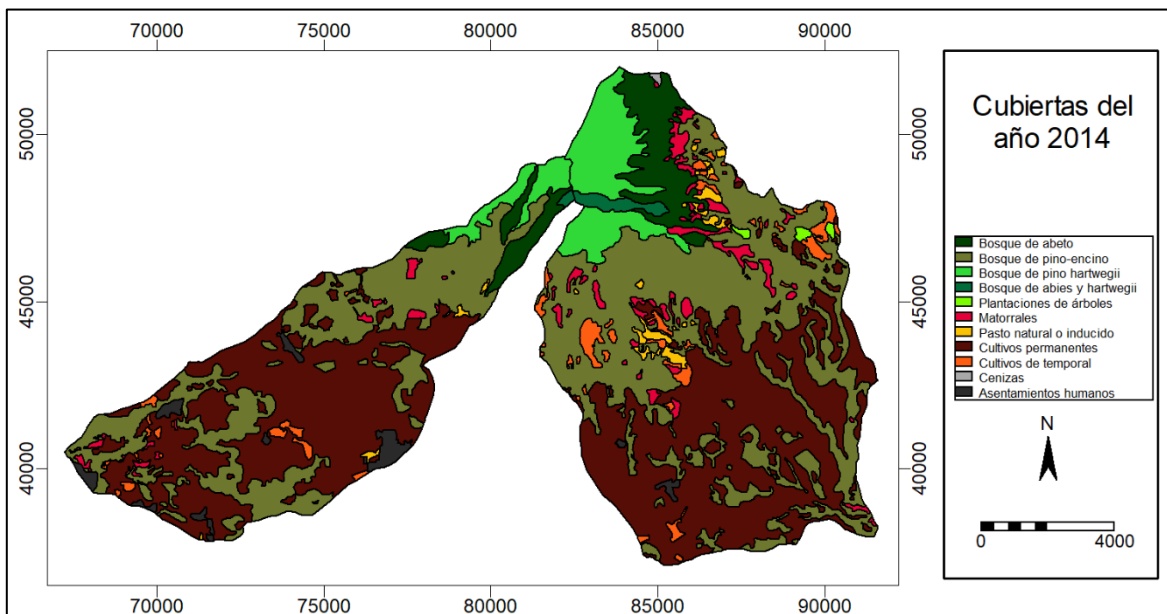
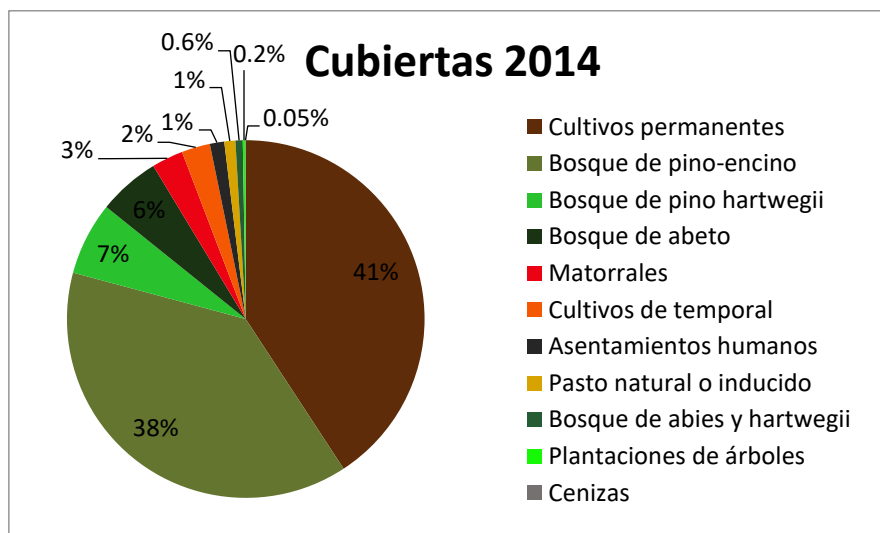
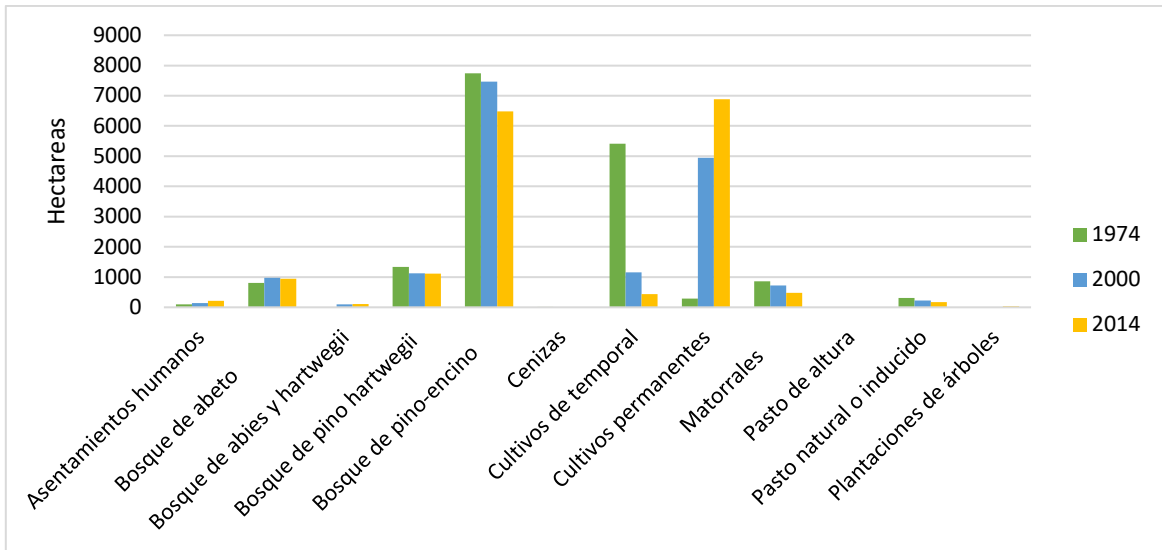


Figura 6. Mapa cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra del año 2014.



Gráfica 3. Porcentaje de cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancítaro y La Culebra del año 2014.



Gráfica 4. Comparación de las cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancitaro y La Culebra.

Se observa una reducción drástica de los cultivos de temporal, al tiempo que hay un gran crecimiento de los cultivos permanentes. También se reduce el pino-encino.

Procesos de cambio

En el periodo de 1974 a 2000 la deforestación fue de 7.5%, hubo una recuperación de 7.5% y una degradación de 1.5%.

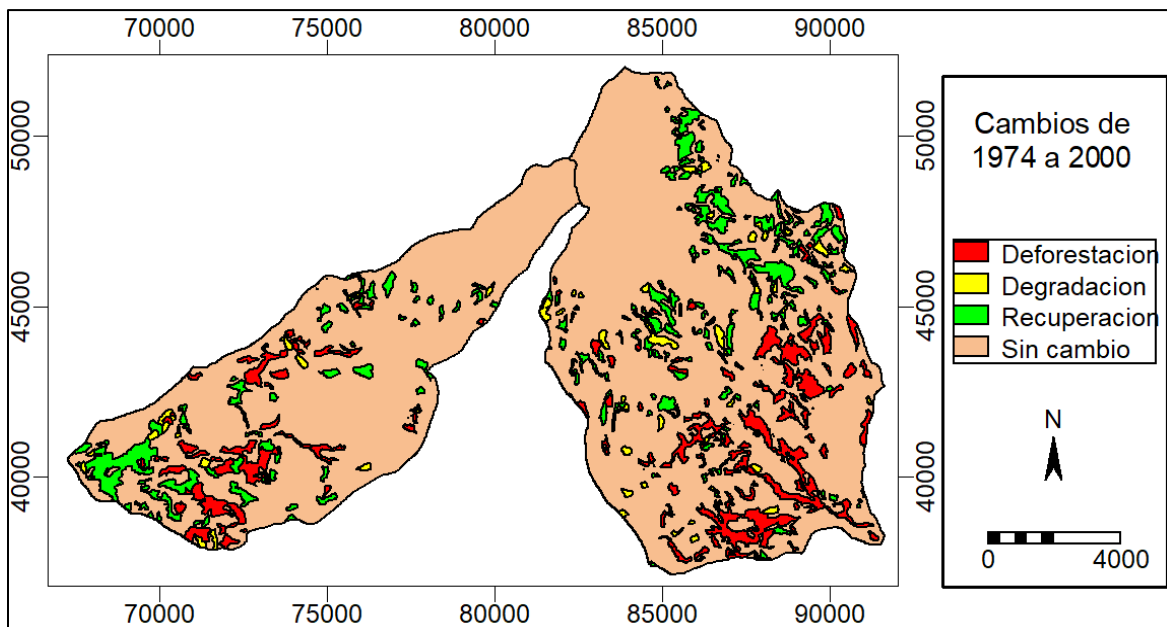


Figura 7. Mapa de cambios en las cuencas Tancitaro y La Culebra de 1974 a 2000

Durante el periodo del 2000 al 2014 se deforestó el 7.9%, se degradó el .41% y se recuperó el 1.2%.

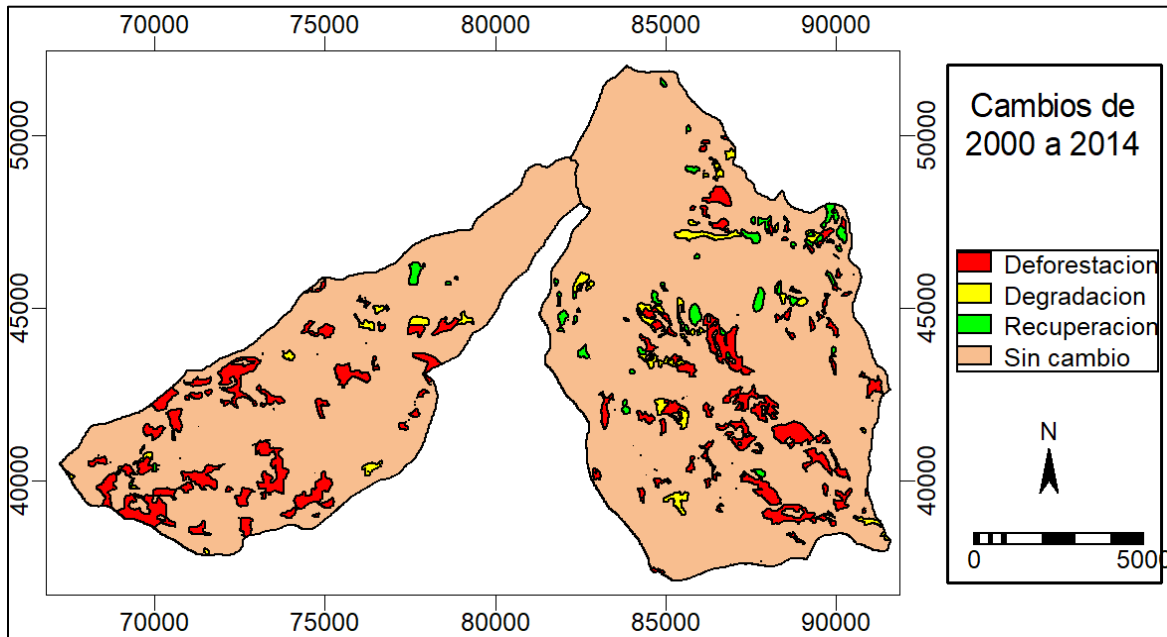


Figura 8. Mapa de cambios en las cuencas Tancítaro y La Culebra del 2000 al 2014.

La deforestación en el periodo total (1974-2014) fue de 13.6%, mientras que se recuperó el 5.7% y solo se degradó el 1.9%.

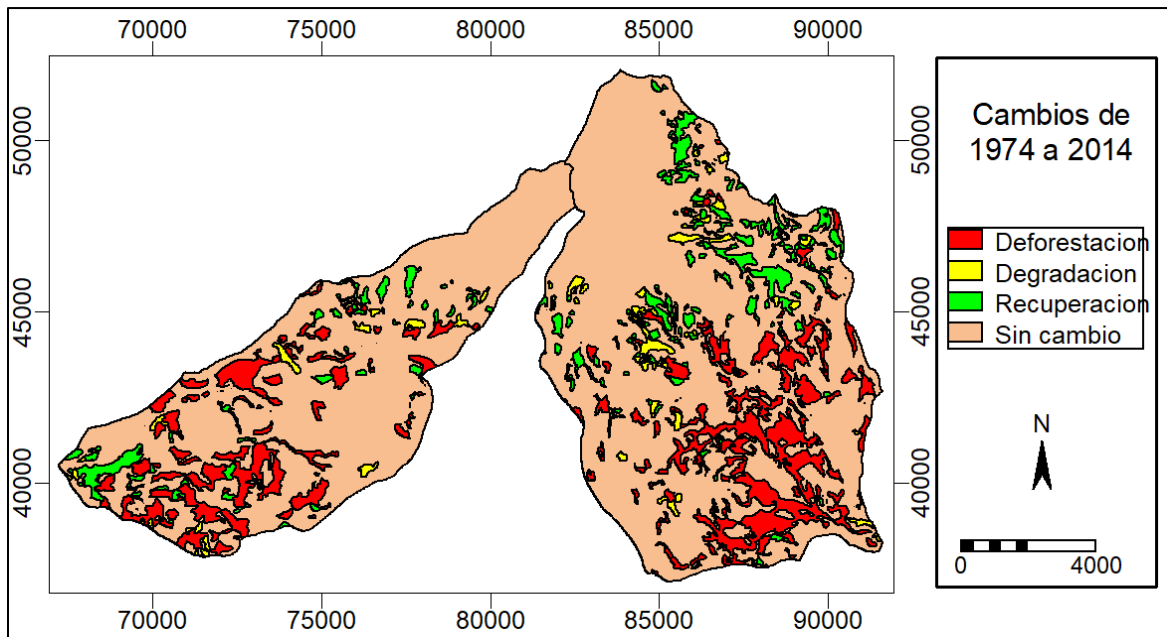


Figura 9. Mapa de cambios en las cuencas Tancítaro y La Culebra de 1974 a 2014

Matrices de cambio

En la matriz de 1974 a 2000 se puede observar que las cubiertas y usos del suelo con más probabilidad de cambio son el pasto de altura y los cultivos de temporal, convirtiéndose principalmente a cultivos permanentes. El pasto de altura pasa en gran parte a ser pino hartwegii o pino-encino. Los matorrales en su mayoría se convierten en pino-encino.

Tabla 4. Matriz de transición de cubiertas en el área completa 1974-2000.

Año 1974	Año 2000										
	Bosque de abeto	Bosque de pino-encino	Bosque de pino hartwegii	Bosque de abies y hartwegii	Matorrales	Pasto de altura	Pasto natural o inducido	Cultivos permanentes	Cultivos de temporal	Cenizas	Asentamientos humanos
Bosque de abeto	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bosque de pino-encino	0	86.39	0	0	0.75	0	0.18	12.09	0.51	0	0
Bosque de pino hartwegii	8.91	0	83.95	7.14	0	0	0	0	0	0	0
Bosque de abies y hartwegii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matorrales	4.78	37.7	0	0	25.96	0	1.54	20.97	9.05	0	0
Pasto de altura	0	36.32	43.37	0	0	20.31	0	0	0	0	0
Pasto natural o inducido	0.35	8.38	0	0	23.61	0	10.63	34.49	21.41	0	1.12
Cultivos permanentes	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0
Cultivos de temporal	0.08	7.88	0	0	6.87	0	3.11	63.4	18.04	0	0.61
Cenizas	26.43	0	0	0	0	0	0	0	0	73.57	0
Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

En el periodo 2000 al 2014 sigue habiendo un cambio importante de los cultivos de temporal y el pasto natural o inducido hacia los cultivos permanentes, además de que el cambio mayor de los matorrales se da también hacia los cultivos permanentes.

Tabla 5. Matriz de transición de cubiertas en el área completa 2000-2014

	Año 2014											
	Bosque de abeto	Bosque de pino-encino	Bosque de pino hartwegii	Bosque de abies y hartwegii	Plantaciones de árboles	Matorrales	Pasto de altura	Pasto natural o inducido	Cultivos permanentes	Cultivos de temporal	Cenizas	Asentamientos humanos
Año 2000												
Bosque de abeto	95.17	0	0	1.58	0	3.25	0	0	0	0	0	0
Bosque de pino-encino	0	85.43	0	0	0.11	1.67	0	0.02	12.43	0.07	0	0.27
Bosque de pino hartwegii	1.37	0	98.63	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Bosque de abies y hartwegii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plantaciones de árboles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matorrales	0	10.54	0	0	2.45	33.87	0	9.3	34.97	5.68	0	3.2
Pasto de altura	0	0	100	0	0	0	0	19.35	0	0	0	0
Pasto natural o inducido	0	0.72	0	0	2.55	8.4	0	0	39.49	28.72	0	0.78
Cultivos permanentes	0	0.06	0	0	0	0	0	0	99.45	0	0	0.5
Cultivos de temporal	0	1.78	0	0	0.48	4.86	0	4.82	59.66	27.85	0	0.55
Cenizas	0	0	0	0	0	18.51	0	0	0	0	74.43	0
Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

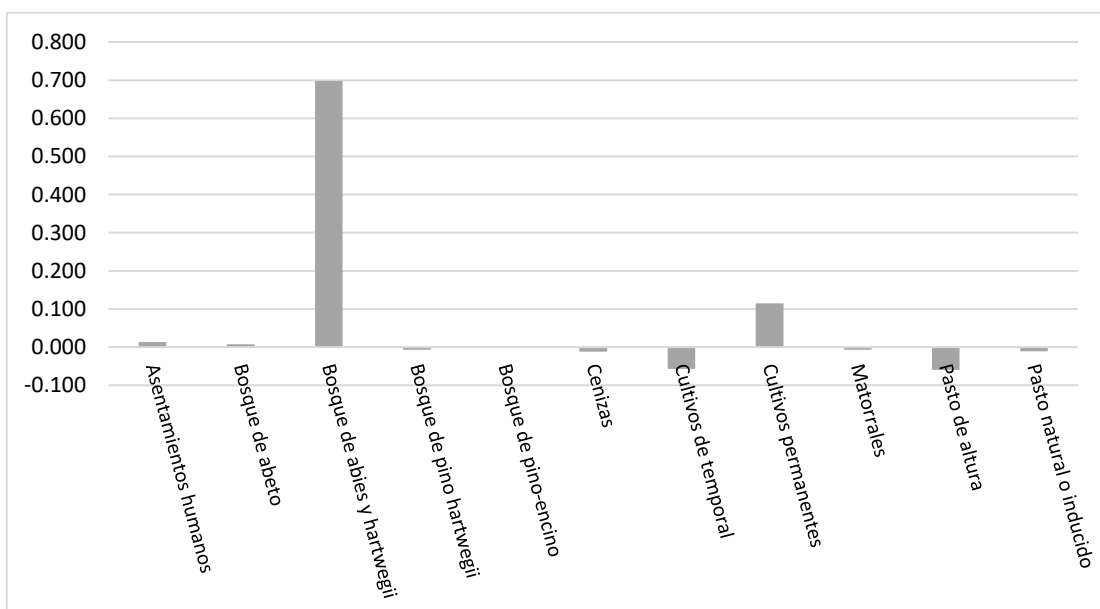
En el periodo completo se observa la tendencia de conversión hacia cultivos permanentes, principalmente a partir de de los cultivos de temporal, el pasto natural o inducido y los matorrales. Estos últimos además tienen un cambio importante hacia bosque-encino. El pasto de altura pasa a ser pino hartwegii o pino-encino.

Tabla 6. Matriz de transición de cubiertas en al área completa 1974-2014

	Año 2014											
	Bosque de abeto	Bosque de pino-encino	Bosque de pino hartwegii	Bosque de abies y hartwegii	Plantaciones de árboles	Matorrales	Pasto de altura	Pasto natural o inducido	Cultivos permanentes	Cultivos de temporal	Cenizas	Asentamientos humanos
Año 1974												
Bosque de abeto	96.27	0	0	1.91	0	1.82	0	0	0	0	0	0
Bosque de pino-encino	0	75.71	0	0	0.1	1.43	0	0.03	22.5	0.05	0	0.18
Bosque de pino hartwegii	8.99	0	82.8	7.14	0	1.07	0	0	0	0	0	0
Bosque de abies y hartwegii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plantaciones de árboles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matorrales	4.46	23.61	0	0	0.41	7.95	0	3.48	51.63	5	0	3.49
Pasto de altura	0	36.3	63.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pasto natural o inducido	0.35	4.92	0	0	0	17.03	0	9.92	54.57	12.08	0	1.12
Cultivos permanentes	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0
Cultivos de temporal	0.08	7.36	0	0	0.47	4.02	0	1.97	78.29	6.49	0	1.31
Cenizas	31.61	0	0	0	0	13.62	0	0	0	0	54.76	0
Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

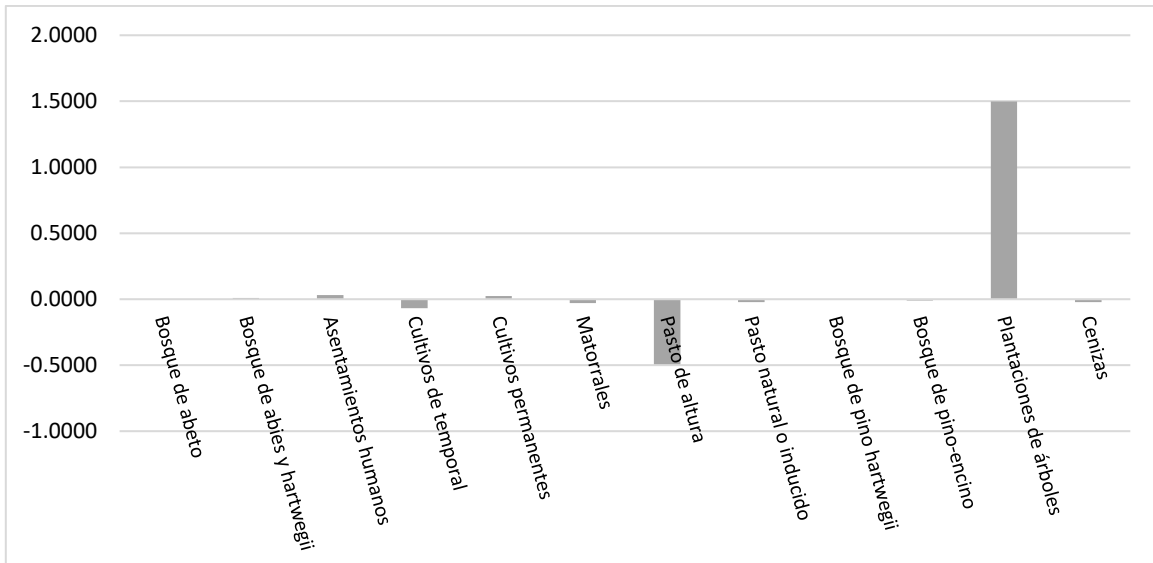
Tasas de cambio anual

Entre los años 1974 y 2000 la tasa de cambio anual de los cultivos permanentes fue de 11.5%, seguida de pasto de altura y cultivo de temporal con -5.6% y -5.7% de tasa anual respectivamente. La tasa más alta fue de bosque de abies y hartwegii con 69.84%, aunque la superficie que ocupa es mínima; sin embargo, está cubierta no existía en 1974.



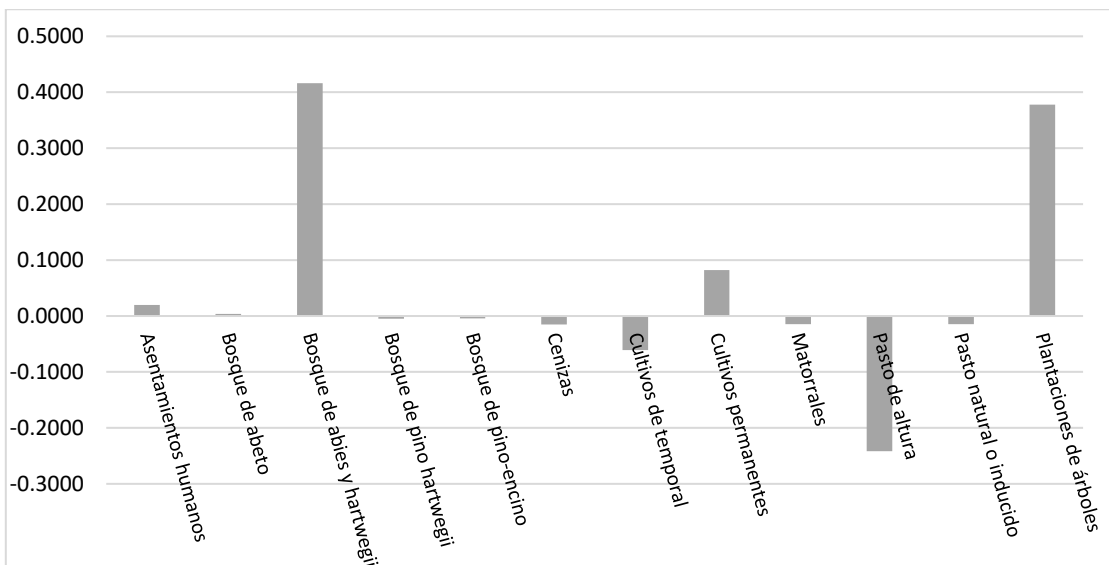
Gráfica 5. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancitaro y La Culebra de 1974 a 2000

Entre los años 2000 y 2014 el cambio más importante fue el de los cultivos de temporal con una tasa anual de -6.8%. En general las tasas fueron bajas en este periodo, a excepción del pasto de altura y las plantaciones de árboles, ya que el pasto de altura desaparece por tanto la tasa de cambio obtenida es de -49.1%; y aparecen las plantaciones de árboles, de tal manera que tenemos una tasa muy alta, de 149.9%.



Gráfica 6. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancitaro y La Culebra de 2000 a 2014

En el periodo completo de 1974 a 2014 las tasas de cambio más importantes correspondieron a los cultivos permanentes con 8.2% y los cultivos de temporal con -6.1%, seguidos de los asentamientos humanos con 1.9%, el pasto natural o inducido -1.5%, ceniza con -1.5% y los matorrales con -1.5%. El pasto de altura al desaparecer en el 2014 obtuvo una tasa de -24.2%, y el bosque de abies y hartwegii y las plantaciones de árboles tuvieron tasas de 41.6% y 37.8% respectivamente al no estar presentes en el primer año de interpretación.



Gráfica 7. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo de las cuencas Tancitaro y La Culebra de 1974 a 2014

Cuenca Tancítaro

Cubiertas y usos del suelo

Las cubiertas de suelo dominantes en 1974 fueron los bosques de pino-encino (2739 ha) y los cultivos de temporal (2608 ha), le siguen los matorrales (540 ha), el bosque de abeto (292 ha), bosque de pino hartwegii (253 ha), asentamientos humanos (101 ha), finalmente están el pasto natural e inducido (59 ha) y cultivos permanentes (19 ha).

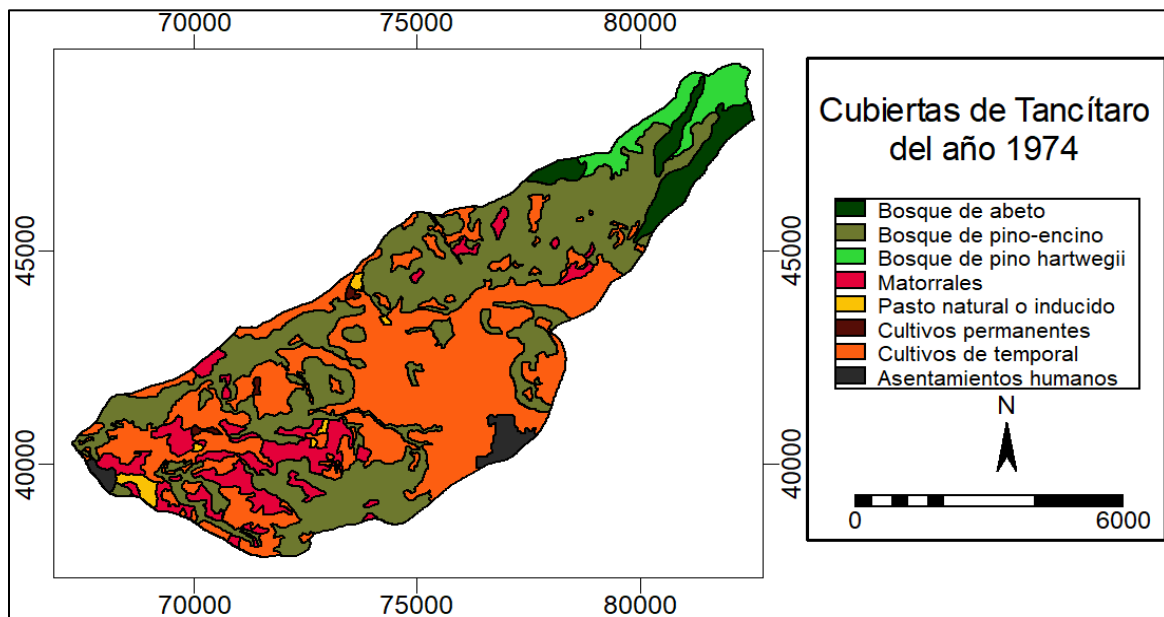
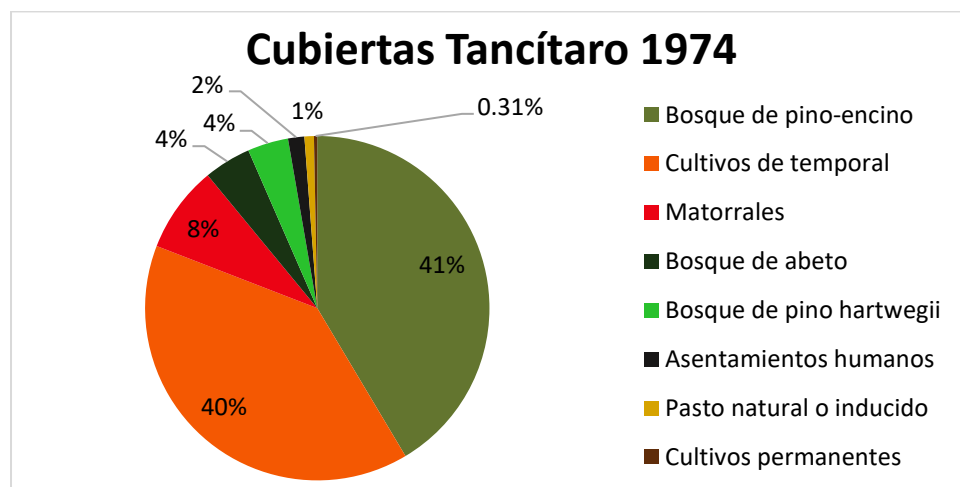


Figura 10. Mapa de cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancítaro para el año 1974.



Gráfica 8. Porcentaje de cubiertas y usos de suelo de la cuenca Tancítaro para el año 1974.

En el 2000 las mayores cubiertas de suelo fueron el bosque de pino-encino (2934 ha) y cultivos permanentes (2172 ha), siguen los cultivos de temporal (520 ha), bosque de abeto (292 ha), bosque de pino hartwegii (253 ha), matorrales (247 ha), asentamientos humanos (138 ha) y finalmente pasto natural o inducido (56 ha).

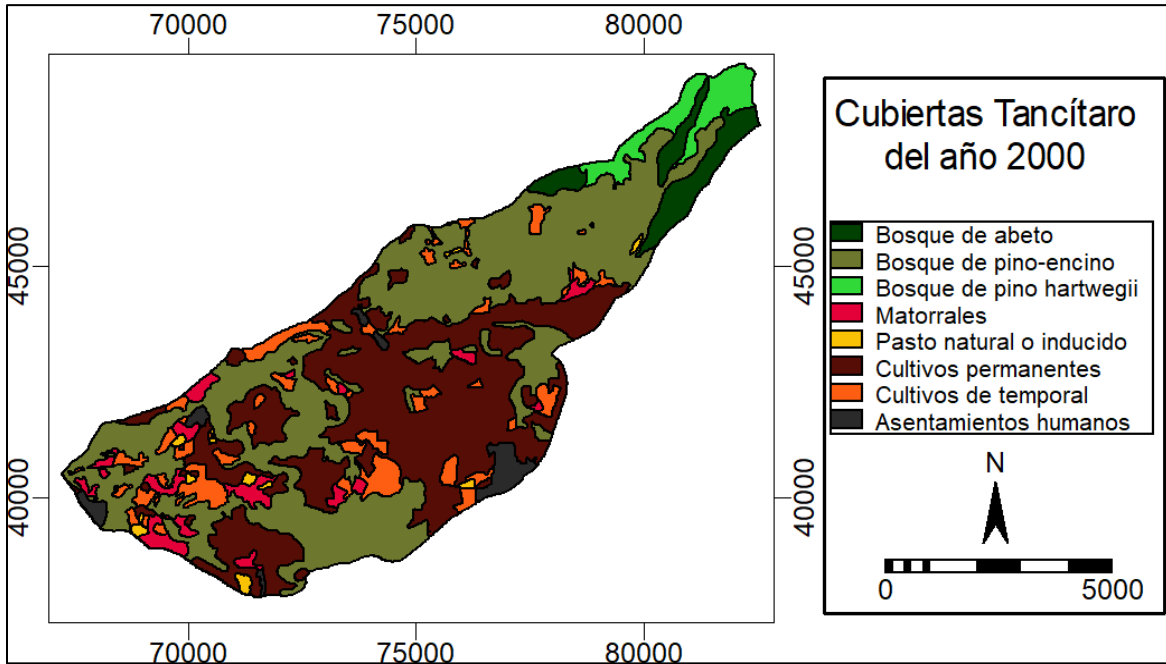
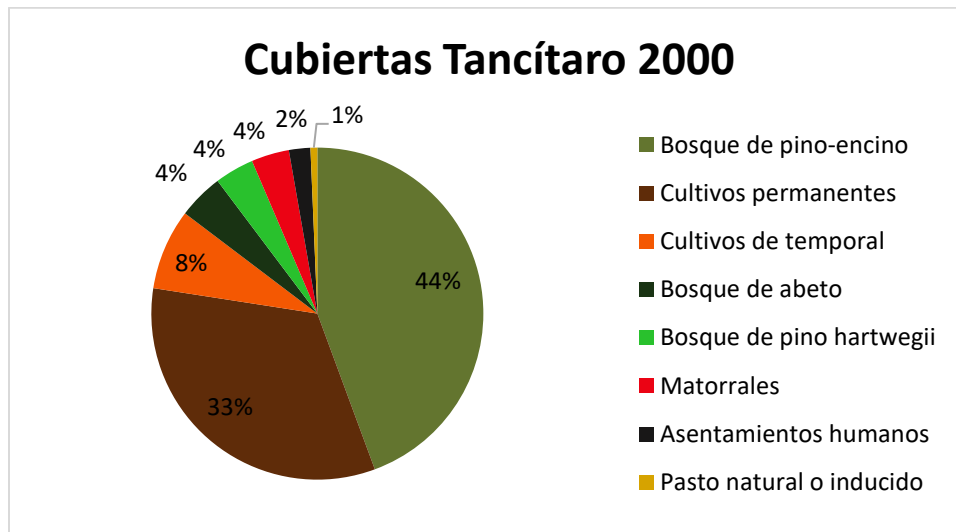


Figura 11. Mapa de cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancítaro para el año 2000.



Gráfica 9. Porcentajes de cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancítaro para el año 2000.

Las cubiertas de suelo dominantes del 2014 son los cultivos permanentes (3218 ha) y el bosque de pino-encino (2444 ha), le siguen bosque de abeto (277 ha), bosque de pino hartwegii (253 ha), asentamientos humanos (193 ha), cultivos de temporal (97 ha), matorrales (90 ha), finalmente están pasto natural e inducido (23 ha) y bosque de abies y hartwegii (15 ha).

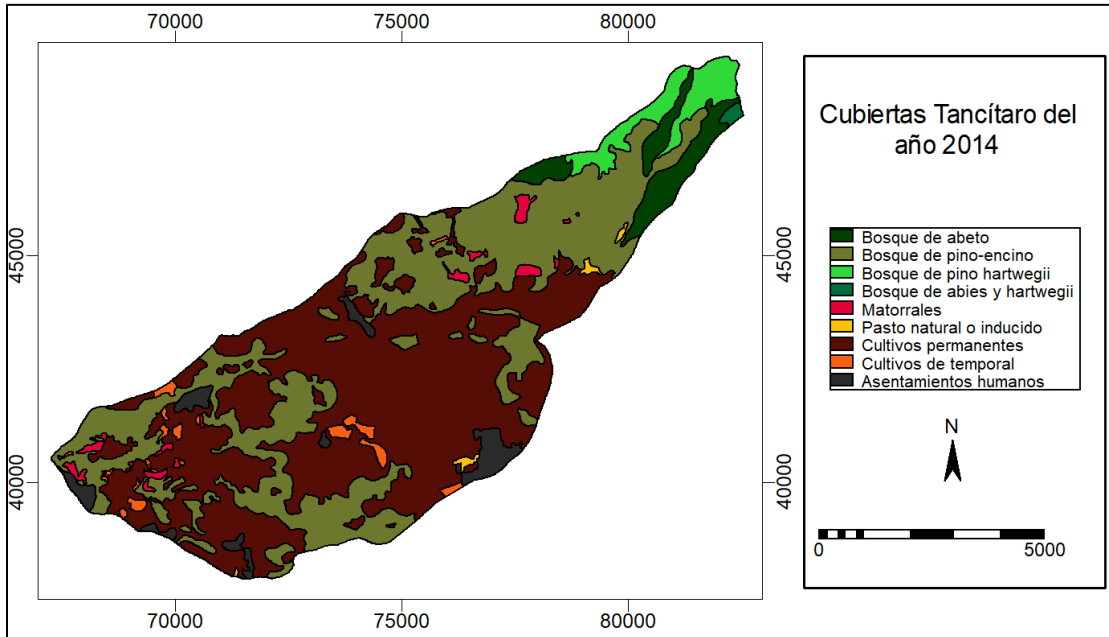
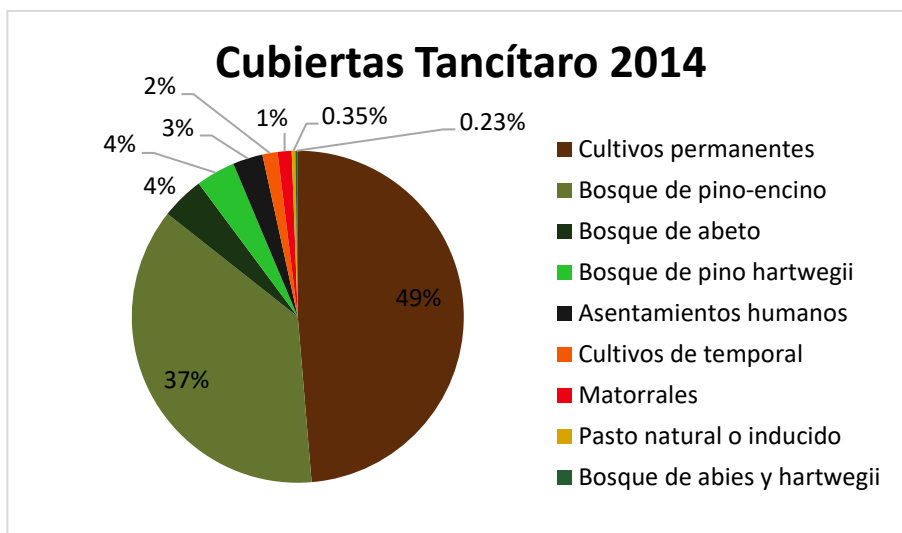
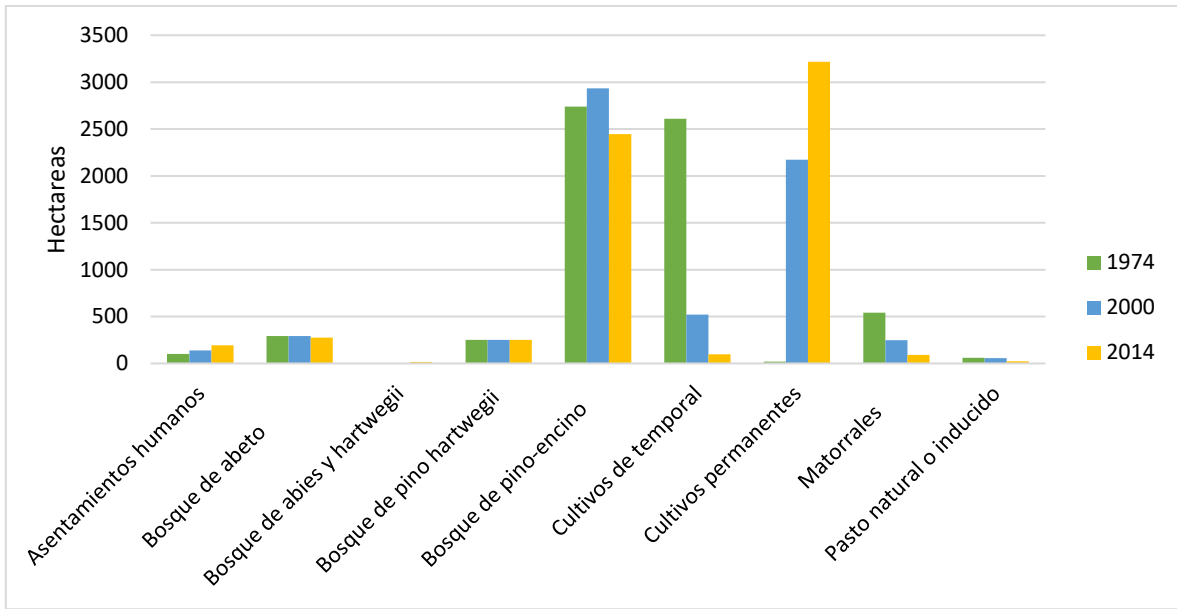


Figura 12. Mapa de cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancítaro para el año 2014



Gráfica10. Porcentajes de cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancítaro para el año 2014.



Gráfica 11. Comparación de las cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancitaro.

Se observa una reducción drástica de los cultivos de temporal, al tiempo que hay un gran crecimiento de los cultivos permanentes.

Procesos de cambio

En el periodo de 1974 a 2000 la deforestación fue de 6.1%, hubo una recuperación de 7.8% y una degradación de 1.2%.

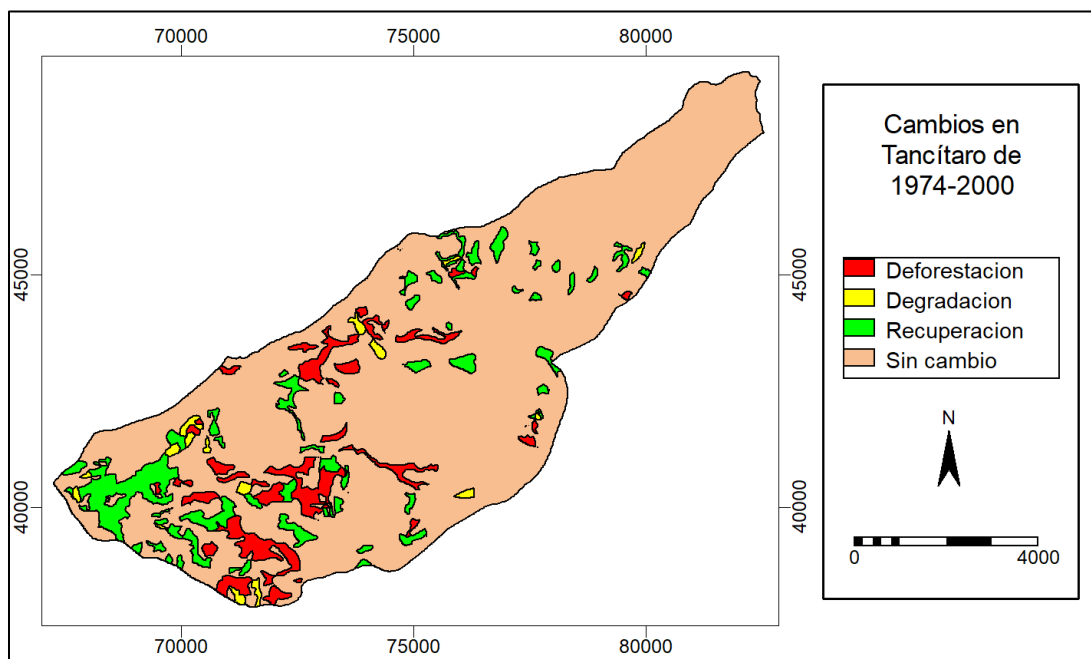


Figura 13. Mapa de cambios en la cuenca Tancitaro de 1974 a 2000.

Durante el periodo del 2000 al 2014 se deforestó el 10.1%, se degradó el 0.9% y se recuperó el 0.3%.

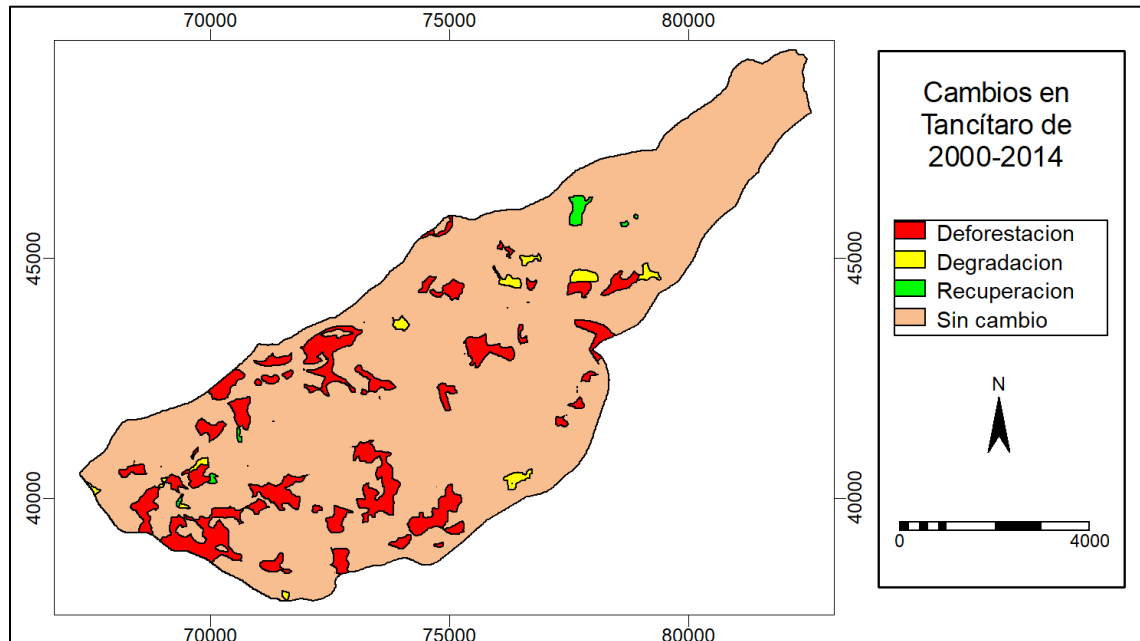


Figura 14. Mapa de cambios en la cuenca Tancítaro del 2000 a 2014.

La deforestación en el periodo total (1974-2014) fue de 14.2%, mientras que se se recuperó el 4.6%, solo se degradó el 1.6%

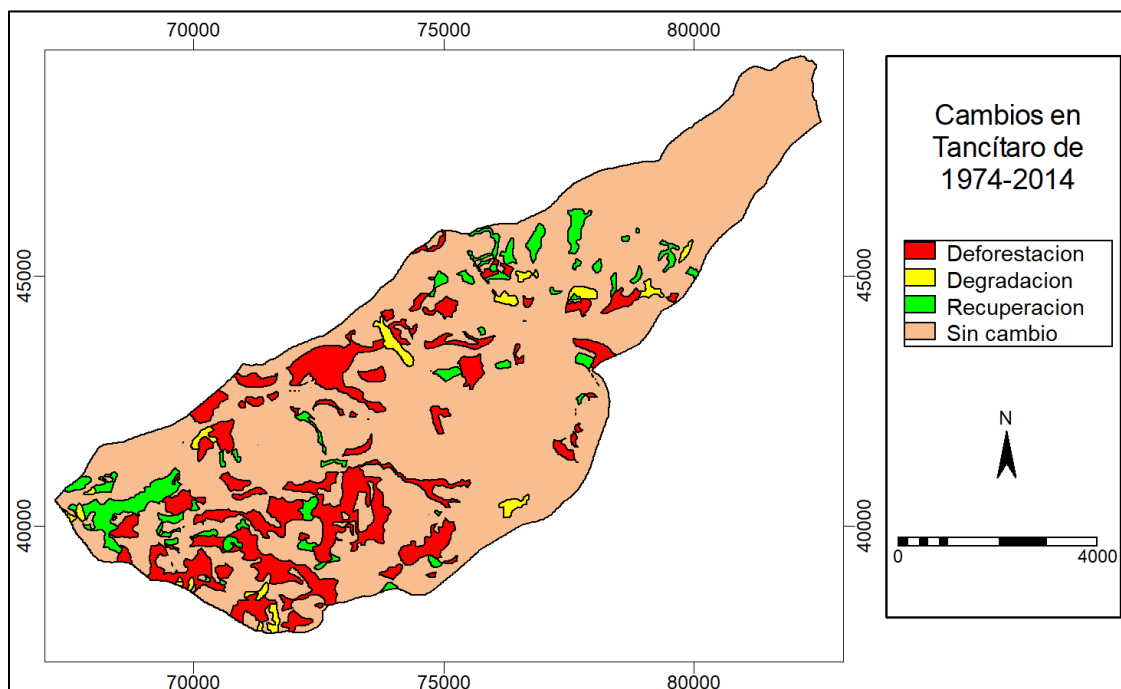


Figura 15. Mapa de cambios en la cuenca Tancítaro de 1974 a 2014.

Las cubiertas con mayor probabilidad de cambio son los cultivos de temporal, el pasto natural o inducido y los matorrales, cambiando en su mayor parte a cultivos permanentes, los matorrales también se convierten en pino-encino.

Tabla 7. Matriz de transición de cubiertas de la cuenca Tancitaro 1974-2000.

Año 1974	Año 2000							
	Bosque de abeto	Bosque de pino-encino	Bosque de pino hartwegii	Matorrales	Pasto natural o inducido	Cultivos permanentes	Cultivos de temporal	Asentamientos humanos
Bosque de abeto	100	0	0	0	0	0	0	0
Bosque de pino-encino	0	91.98	0	0.11	0.11	6.91	0.3	0.22
Bosque de pino hartwegii	0	0	100	0	0	0	0	0
Matorrales	0	39.87	0	24.04	0.95	29.49	5.64	0
Pasto natural o inducido	0	16.91	0	5.9	22.76	31.16	17.4	5.88
Cultivos permanentes	0	0	0	0	0	100	0	0
Cultivos de temporal	0	7.23	0	3.86	1.32	68.49	18.07	1.04
Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0	100

Los cambios más grandes se dan hacia convertirse en los cultivos permanentes, las cubiertas que menos permanecen son el pasto natural o inducido, los matorrales y los cultivos de temporal.

Tabla 8. Matriz de transición de cubiertas de la cuenca Tancitaro 2000-2014.

Año 2000	Año 2014								
	Bosque de abeto	Bosque de pino-encino	Bosque de pino hartwegii	Bosque de abies y hartwegii	Matorrales	Pasto natural o inducido	Cultivos permanentes	Cultivos de temporal	Asentamientos humanos
Bosque de abeto	94.76	0	0	5.24	0	0	0	0	0
Bosque de pino-encino	0	83.31	0	0	1.18	0	14.78	0.04	0.68
Bosque de pino hartwegii	0	0	100	0	0	0	0	0	0
Bosque de abies y hartwegii	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matorrales	0	0	0	0	12.12	0	75.36	3.11	9.39
Pasto natural o inducido	0	0	0	0	8.58	10.61	59.16	18.48	3.17
Cultivos permanentes	0	0	0	0	0	0	99.8	0	0.19
Cultivos de temporal	0	0	0	0	3.96	3.36	76.38	15.06	1.23
Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0	0	100

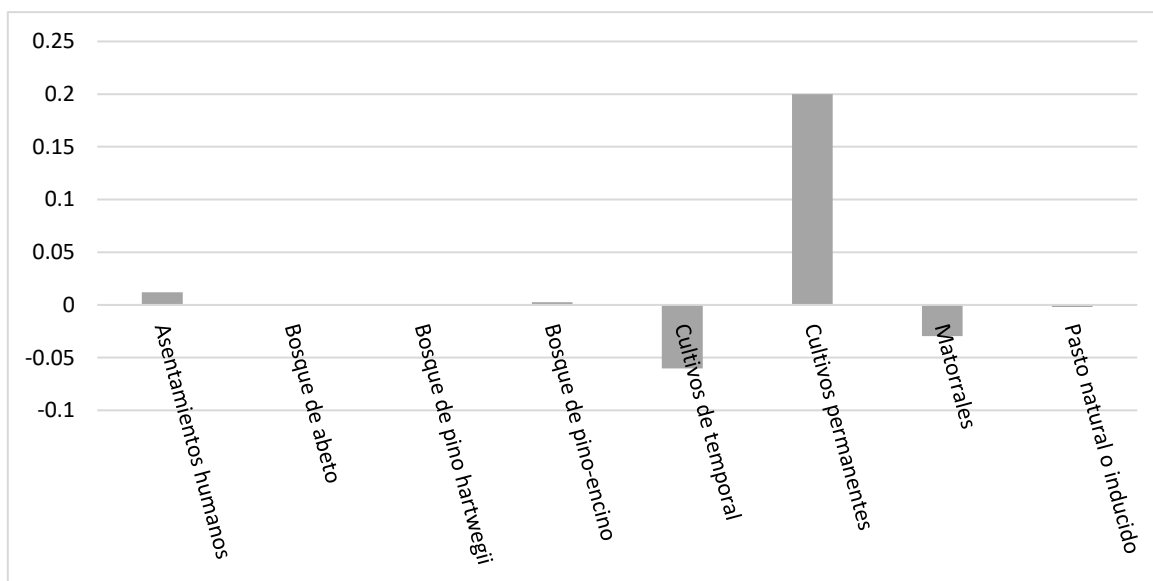
El pasto natural o inducido, los matorrales y los cultivos de temporal tienden a convertirse en cultivos permanentes.

Tabla 9. Matriz de transición de cubiertas de la cuenca Tancitaro 1974-2014.

Año 1974	Año 2000								
	Bosque de abeto	Bosque de pino-encino	Bosque de pino hartwegii	Bosque de abies y hartwegii	Matorrales	Pasto natural o inducido	Cultivos permanentes	Cultivos de temporal	Asentamientos humanos
Bosque de abeto	94.76	0	0	5.24	0	0	0	0	0
Bosque de pino-encino	0	79.82	0	0	1.16	0	18.51	0	0.52
Bosque de pino hartwegii	0	0	100	0	0	0	0	0	0
Bosque de abies y hartwegii	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matorrales	0	19.87	0	0	1.83	0	72.47	1.1	4.72
Pasto natural o inducido	0	8.3	0	0	4.55	0	67.2	14.08	5.88
Cultivos permanentes	0	0	0	0	0	0	100	0	0
Cultivos de temporal	0	5.57	0	0	1.76	0.9	86.7	3.19	1.88
Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0	0	100

Tasas de cambio anual

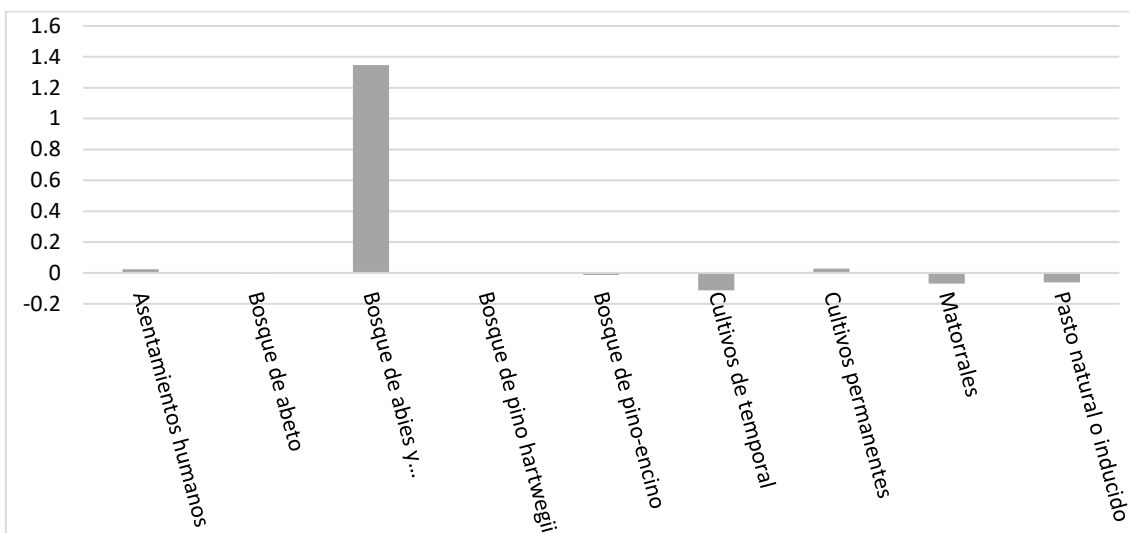
De 1974 al 2000 el mayor cambio fue de los cultivos permanentes con 19.99% de tasa anual, los cultivos de temporal también tuvieron un gran cambio con -6.01%, al igual los matorrales con -2.96%.



Gráfica 12. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo de la cuenca Tancitaro de 1974 a 2000.

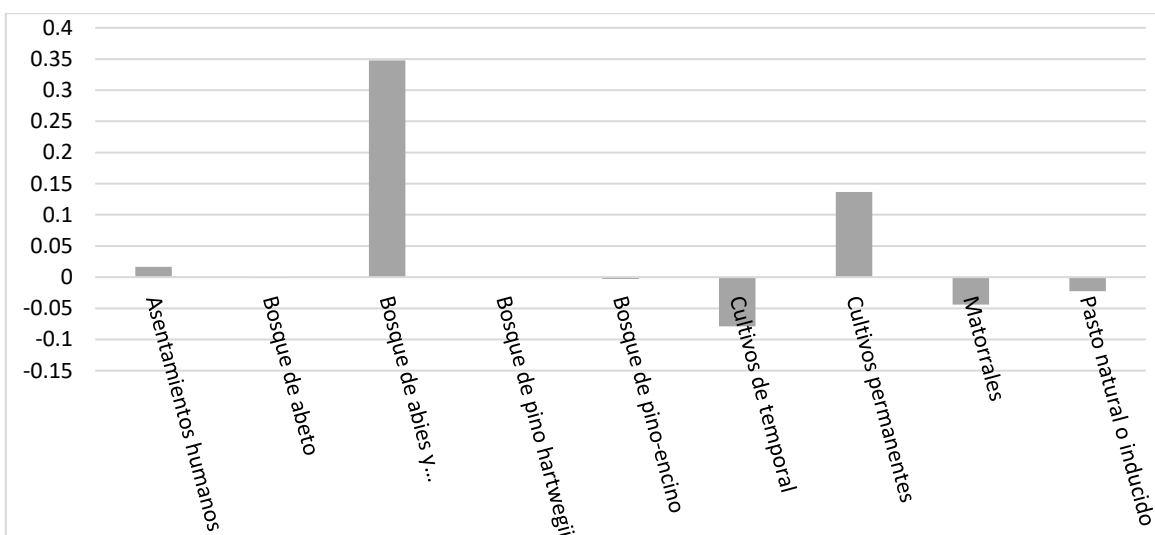
Del 2000 al 2014 los cultivos de temporal tuvieron una importante disminución con una tasa del -11.27%, de igual forma los matorrales tuvieron una tasa de -6.95% y el pasto natural o inducido de -6.02%. En cambio, los cultivos permanentes tuvieron una tasa de 2.85% y los asentamientos humanos de 2.45%. Por otro lado,

surge el bosque de abies y hartwegii así que tiene una tasa de 134.63%, aunque su área es más baja respecto a otras cubiertas.



Gráfica 13. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo de la cuenca de la cuenca Tancitaro de 2000 a 2014.

En el periodo de 1974 a 2014 solo tres cubiertas tuvieron tasas positivas, estas fueron los cultivos permanentes con 13.69%, los asentamientos humanos con 1.63% y el bosque de abies y hartwegii con 34.78%. Las demás cubiertas decrecieron con tasas de -7.89% para cultivos de temporal, -4.38% para matorrales, -2.27 para el pasto natural o inducido, -0.28 para el bosque de pino-encino y -0.13 para el bosque de abeto.



Gráfica 14. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo de la cuenca de la cuenca Tancitaro de 1974 a 2014.

Cuenca La Culebra
Cubiertas y usos del suelo

En 1974 las cubiertas de suelo dominantes en la cuenca fueron el bosque de pino-encino (5002 ha), los cultivos de temporal (2709 ha) y el bosque de pino hartwegii (1087 ha), le siguen el bosque de abeto (510 ha), los matorrales (40 ha), los cultivos permanentes (274 ha), el pasto natural e inducido (248 ha), finalmente están las cenizas (14 ha) y el pasto de altura (6 ha).

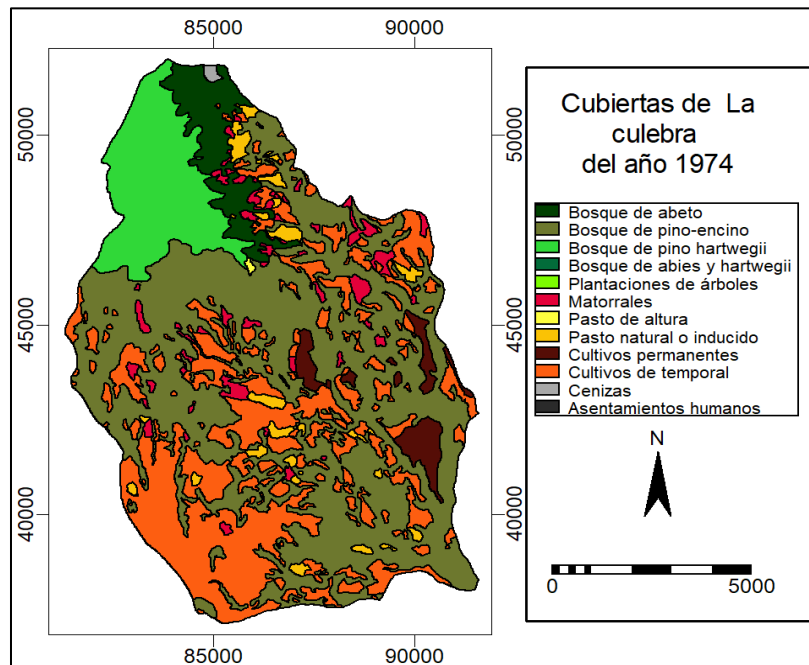
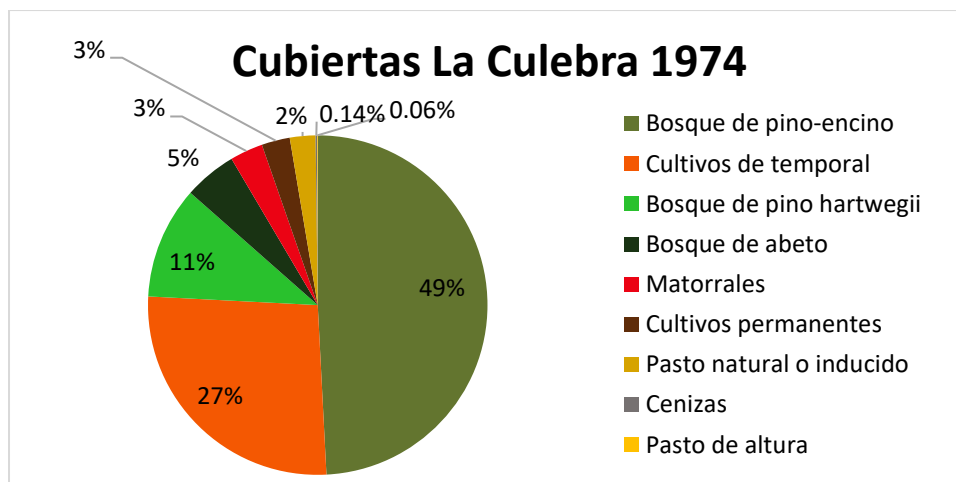


Figura 16. Mapa de cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra para el año 1974.



Gráfica 15. Porcentaje de cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra para el año 1974.

En el 2000 las cubiertas de suelo dominantes fueron el bosque de pino-encino (4533 ha) y los cultivos permanentes (2774 ha), le siguen el bosque de pino hartwegii (875 ha), el bosque de abeto (680 ha), los cultivos de temporal (639 ha), los matorrales (478 ha), el pasto natural o inducido (172 ha), el bosque de abies y hartwegii (96 ha), finalmente están las cenizas (10 ha), los asentamientos humanos (5 ha) y pasto de altura (1 ha).

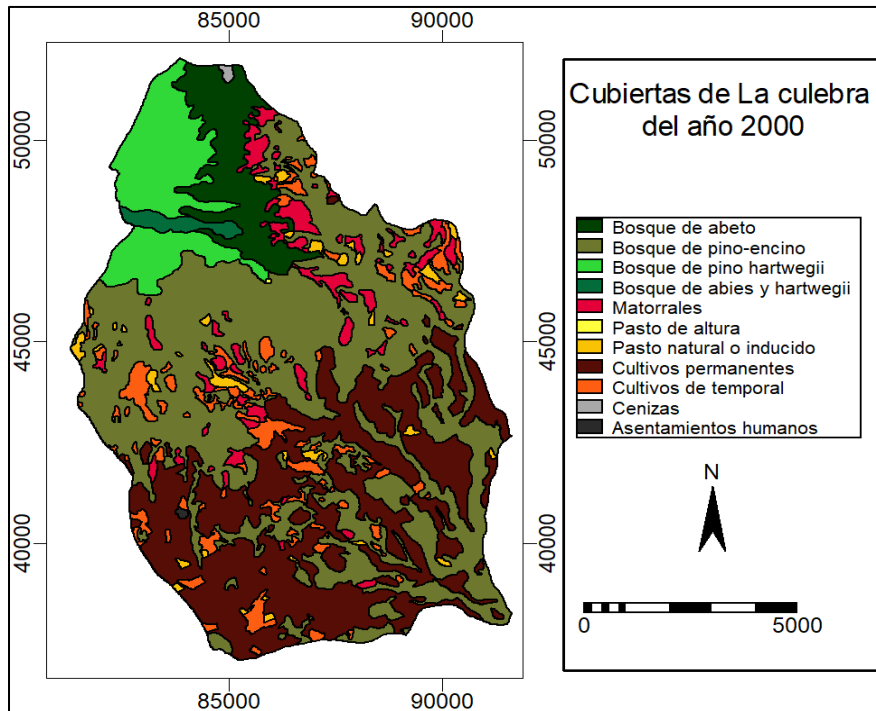
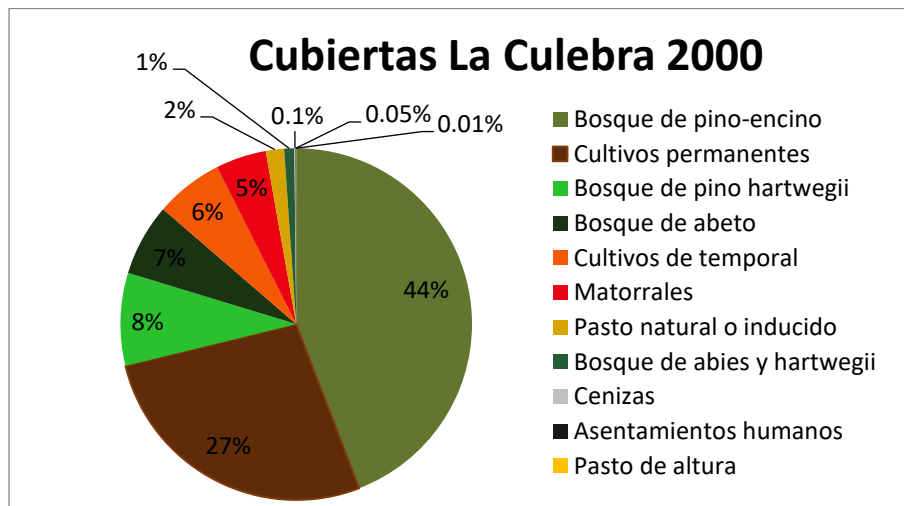


Figura 17. Mapa de cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra para el año 2000.



Gráfica 16. Porcentaje de cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra para el año 2000.

Las cubiertas de suelo dominantes en el 2014 fueron el bosque de pino-encino (4036 ha) y los cultivos permanentes (3665 ha), le siguen el bosque de pino hartwegii (861 ha), el bosque de abeto (665 ha), matorrales (389 ha), cultivos de temporal (337 ha), pasto natural e inducido (146 ha), bosque de abies y hartwegii (96 ha), finalmente están las plantaciones de árboles (37 ha), asentamientos humanos (26 ha) y las cenizas (8 ha).

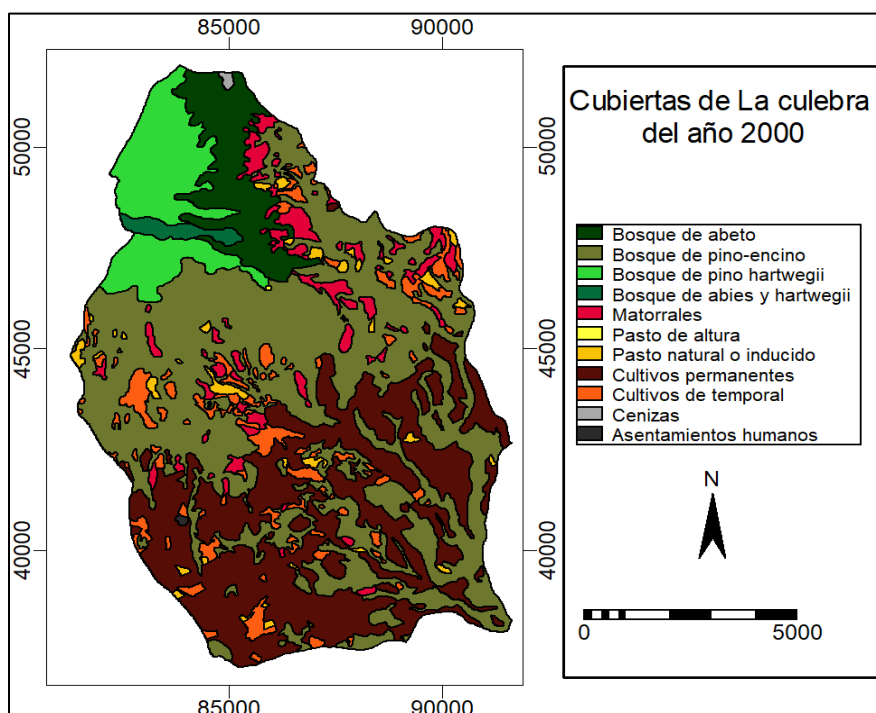
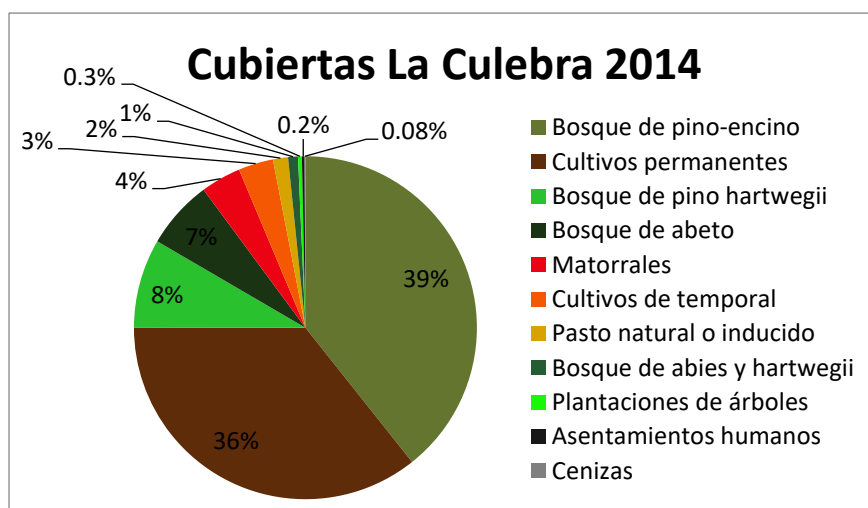
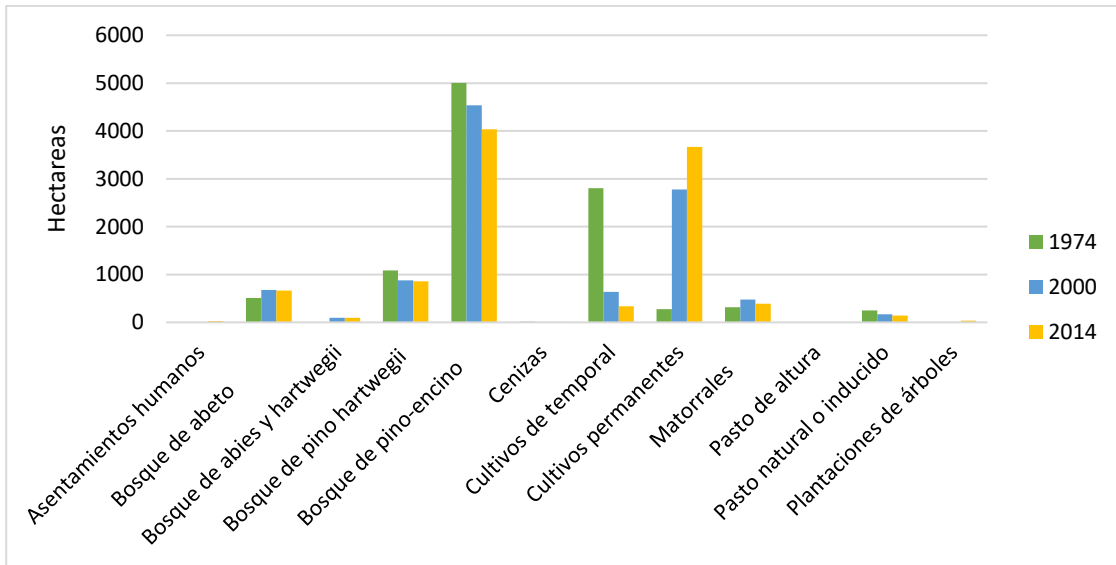


Figura 18. Mapa de cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra para el año 2014.



Gráfica 17. Porcentaje de cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra para el año 2014.



Gráfica 18. Comparación del área de las cubiertas y usos del suelo de la cuenca La Culebra.

Se ve una reducción drástica de los cultivos de temporal, al tiempo que hay un gran crecimiento de los cultivos permanentes.

Procesos de cambio

En el periodo de 1974 a 2000 la deforestación fue de 8.4%, hubo una recuperación de 7.3% y una degradación de 1.7%.

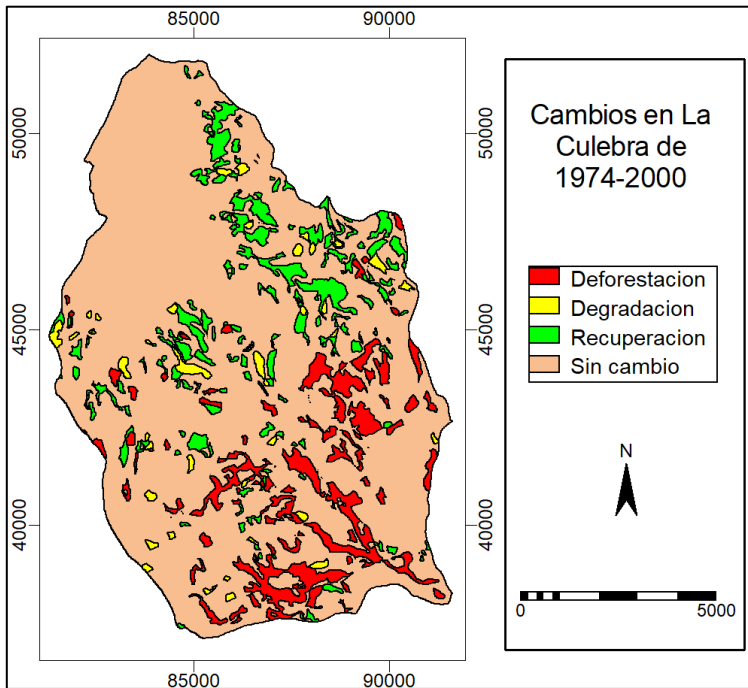


Figura 19. Mapa de cambios en la cuenca La Culebra de 1974 a 2000.

Durante el periodo del 2000 al 2014 se deforestó el 6.5%, se degradó el 1.8% y se recuperó el 1.7%.

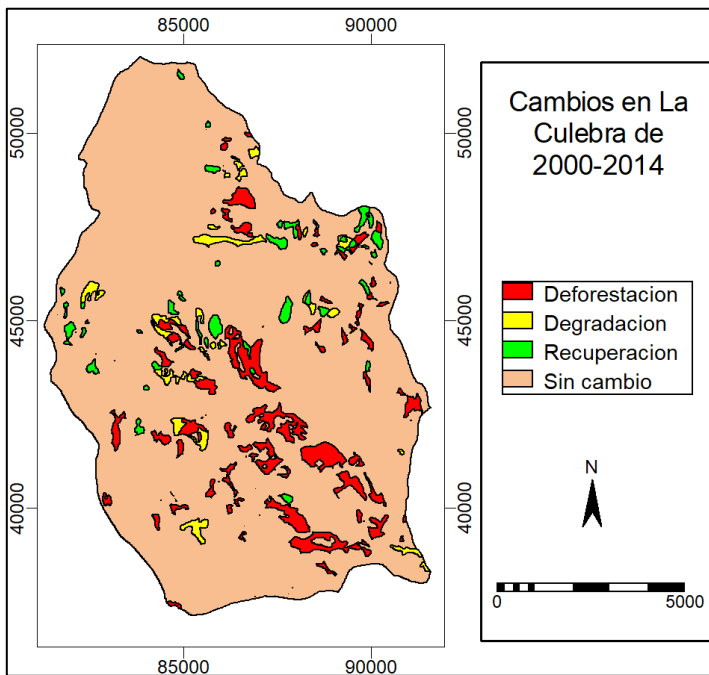


Figura 20. Mapa de cambios en la cuenca La Culebra del 2000 a 2014.

La deforestación en el periodo total (1974-2014) fue de 13.2%, mientras que se recuperó el 6.4%, solo se degradó el 2.1%.

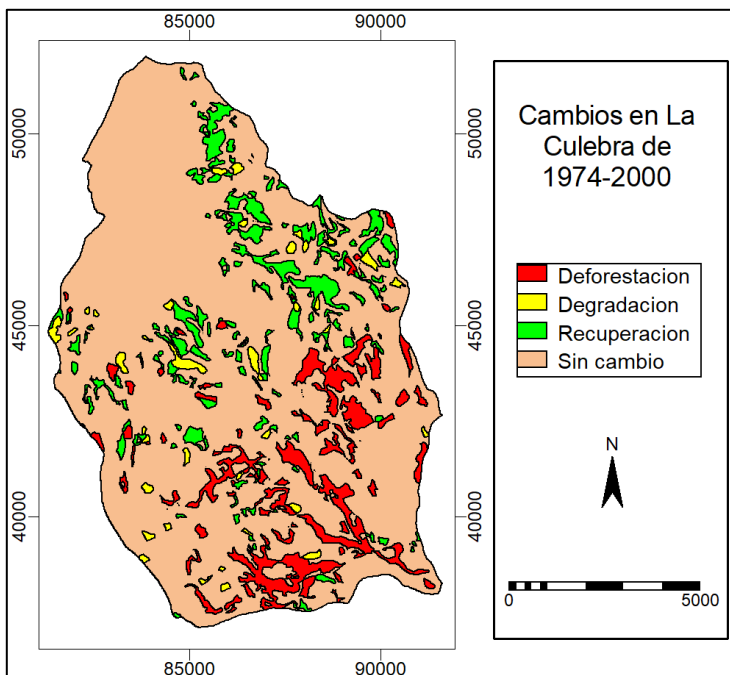


Figura 21. Mapa de cambios en la cuenca La Culebra de 1974 a 2014.

Las cubiertas con mayor probabilidad de cambio son el pasto natural o inducido y los cultivos de temporal, los cambios más importantes se dan hacia los cultivos permanentes y el paso del pasto de altura a pino *hartwegii* o pino-encino.

Tabla 10. Matriz de transición de cubiertas en la cuenca La Culebra 1974-2000.

Año 1974	Año 2000										
	Bosque de abeto	Bosque de pino-encino	Bosque de pino hartwegii	Bosque de abies y hartwegii	Matorrales	Pasto de altura	Pasto natural o inducido	Cultivos permanentes	Cultivos de temporal	Cenizas	Asentamientos humanos
Bosque de abeto	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bosque de pino-encino	0	83.33	0	0	0.9	0	0.22	14.93	0.63	0	0
Bosque de pino hartwegii	10.98	0	80.22	8.8	0	0	0	0	0	0	0
Bosque de abies y hartwegii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matorrales	12.86	34.02	0	0	29.19	0	2.55	6.58	14.8	0	0
Pasto de altura	0	36.32	43.37	0	0	20.31	0	0	0	0	0
Pasto natural o inducido	0.44	6.36	0	0	27.79	0	7.76	35.28	22.36	0	0
Cultivos permanentes	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0
Cultivos de temporal	0.16	8.49	0	0	9.67	0	4.79	58.68	18.02	0	0.2
Cenizas	26.45	0	0	0	0	0	0	0	0	73.55	0
Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

El pasto de altura se convierte completamente en pino *hartwegii*. Los cambios del pasto natural o inducido son especialmente hacia cultivos permanentes y de temporal. Los cultivos de temporal en su mayoría se convierten en cultivos permanentes. Los matorrales tienen cambios más diversificados, como hacia cultivos permanentes, pasto natural o inducido y pino-encino.

Tabla 11. Matriz de transición de cubiertas en la cuenca La Culebra 2000-2014.

	Año 2014											
	Bosque de abeto	Bosque de pino-encino	Bosque de pino hartwegii	Bosque de abies y hartwegii	Plantaciones de árboles	Matorrales	Pasto de altura	Pasto natural o inducido	Cultivos permanentes	Cultivos de temporal	Cenizas	Asentamientos humanos
Año 2000												
Bosque de abeto	95.34	0	0	0	0	4.65	0	0	0	0	0	0
Bosque de pino-encino	0	86.8	0	0	0.17	1.99	0	0.03	10.91	0.09	0	0
Bosque de pino hartwegii	1.76	0	98.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bosque de abies y hartwegii	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Plantaciones de árboles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matorrales	0	15.98	0	0	3.71	45.1	0	14.11	14.1	7	0	0
Pasto de altura	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pasto natural o inducido	0	0.96	0	0	3.37	8.34	0	22.19	33.1	32.04	0	0
Cultivos permanentes	0	0	0	0	0	0	0	0	99.17	0	0	0.74
Cultivos de temporal	0	3.22	0	0	0.87	5.59	0	6.01	46.06	38.26	0	0
Cenizas	7.06	0	0	0	0	18.53	0	0	0	0	74.41	0
Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

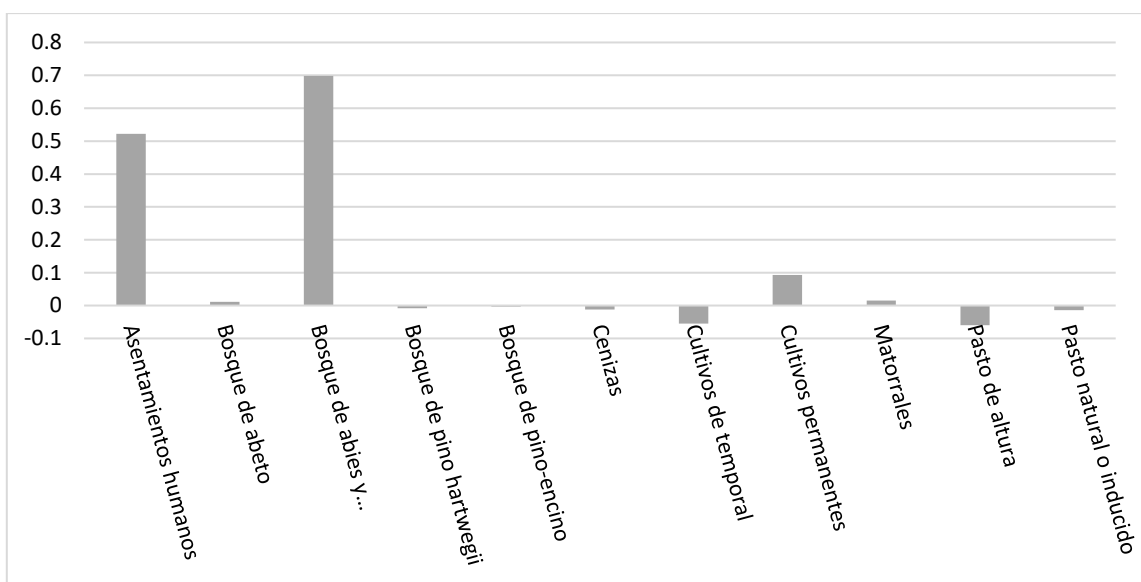
Los cultivos de temporal se convierten en su mayor parte en cultivos permanentes, al igual que el pasto natural o inducido, este tiene otros cambios grandes hacia cultivos de temporal y matorrales. Los matorrales pasan a pino-encino, cultivos de temporal y permanentes. El pasto de altura pasa a ser pino *hartwegii* o pino-encino.

Tabla 12. Matriz de transición de cubiertas en la cuenca La Culebra 1974-2014

	Año 2014											
	Bosque de abeto	Bosque de pino-encino	Bosque de pino hartwegii	Bosque de abies y hartwegii	Plantaciones de árboles	Matorrales	Pasto de altura	Pasto natural o inducido	Cultivos permanentes	Cultivos de temporal	Cenizas	Asentamientos humanos
Año 2000												
Bosque de abeto	97.14	0	0	0	0	2.86	0	0	0	0	0	0
Bosque de pino-encino	0	54.73	0	0	0.16	1.58	0	0.04	24.69	0.07	0	0
Bosque de pino hartwegii	11.08	0	78.8	8.8	0	1.32	0	0	0	0	0	0
Bosque de abies y hartwegii	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plantaciones de árboles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Matorrales	12	29.95	0	0	1.1	18.28	0	9.37	16.39	11.58	0	1.32
Pasto de altura	0	36.3	63.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pasto natural o inducido	0.44	4.12	0	0	0	19.98	0	12.26	51.59	11.6	0	0
Cultivos permanentes	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0
Cultivos de temporal	0.16	9.03	0	0	0.91	6.13	0	2.97	70.47	9.55	0	0.78
Cenizas	31.64	0	0	0	0	13.63	0	0	0	0	54.73	0
Asentamientos humanos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

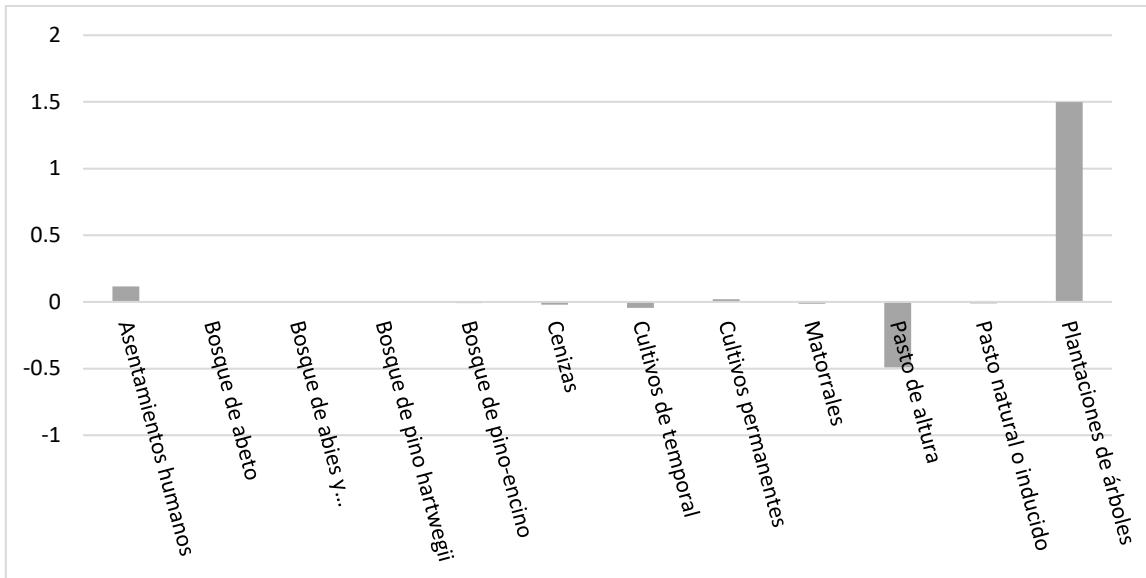
Tasas de cambio anual

Durante el periodo de 1974 al 2000, la cubierta con la tasa de cambio más importante fue la de los cultivos permanentes con 9.3% de tasa, le siguen el pasto de altura con -5.9% y los cultivos de temporal con -5.5%. El bosque de abies y hartwegii y los asentamientos humanos tuvieron tasas de 69.8% y 52.2% respectivamente, ya que no se encuentran en el año de 1974.



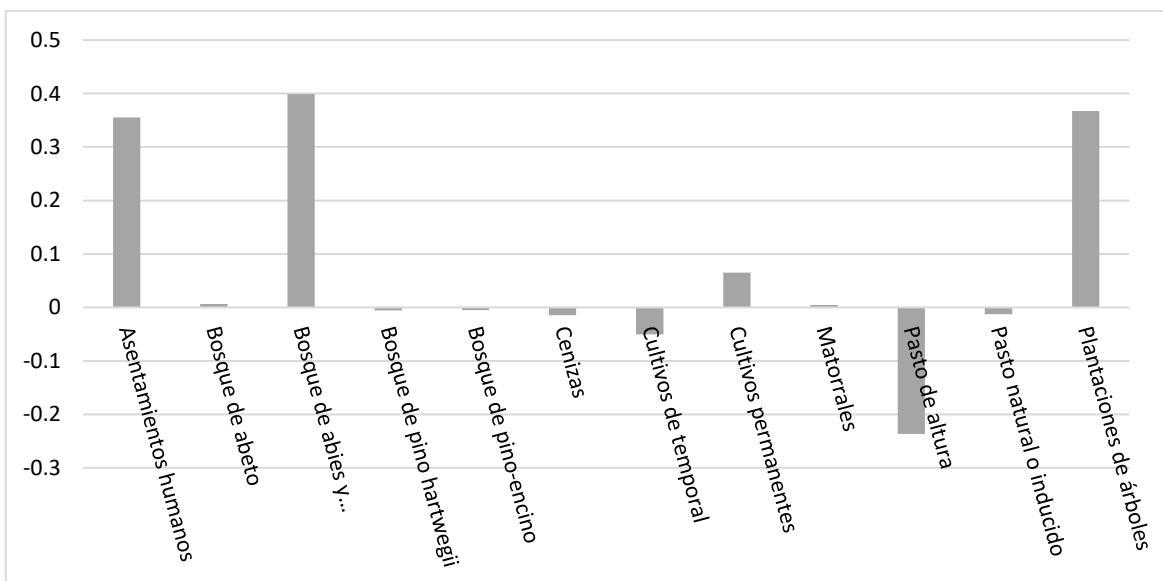
Gráfica 19. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo en la cuenca La Culebra de 1974 a 2000.

De los años 2000 al 2014, la cubierta con un cambio importante fue los asentamientos humanos con una tasa anual de 11.7%, seguida de los cultivos de temporal con -4.5%. Las plantaciones de árboles aparecen en el 2014 por lo tanto obtuvieron una tasa de 149.9%, en cambio desaparece el pasto de altura y tiene una tasa de -49.1%.



Gráfica 20. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo en la cuenca La Culebra de 2000 a 2014.

De 1974 a 2014 los cambios más importantes fueron los de los cultivos permanentes con 6.7% y los cultivos de temporal con -5.2% de tasa anual. Por otro lado, vemos cubiertas con tasas más altas, pero con un área mucho menor respecto a otras cubiertas, desaparece el pasto de altura teniendo así una tasa de -24.2%, y otras cubiertas aparecen, siendo estas los asentamientos humanos, las plantaciones de árboles y el bosque de *abies y hartwegii*, con tasas de 36.6%, 37.8% y 41.1% respectivamente.



Gráfica 21. Tasa de cambio anual de las cubiertas y usos del suelo en la cuenca La Culebra de 1974 a 2014.

Infiltración y escorrentía potenciales

Estimación del escurrimiento potencial

El tipo de suelo hidrológico dominante es el A, suelos muy permeables, casi cubre la totalidad del área y corresponde a los andosoles. Otro tipo de suelo existente en las cuencas es el regosol, que se clasificó en suelos tipo B, medianamente permeables. En una pequeña parte, hay un suelo tipo de D, muy poco permeable, que corresponde a los luvisoles.

Tabla 13. Tipos de suelo hidrológico.

Suelo	Área ha
A	16396.8
B	304.5
D	178.3

El número de curva más bajo es 30, que son algunos puntos de bosque con poca pendiente; sin embargo, para los bosques se obtuvo el número 36 y que es el que abarca más área en los tres años. En 1974 el siguiente NC con mayor superficie fue 67, el cual se encuentra en la agricultura de temporal, y el NC más alto fue 89. En el 2000 y 2014, el segundo NC con mayor superficie fue 44, el cual coincide con la zona de cultivos permanentes, y el valor de NC más grande fue el 92 y su superficie fue de 22.65 ha.

El escurrimiento disminuyó en cada fecha. Esto sucede debido a que el principal cambio de cubiertas se da de cultivos de temporal a cultivos permanentes y estos últimos son capaces de retener más precipitación gracias al follaje de los árboles. En m³ el escurrimiento resultó de la siguiente manera para las dos cuencas:

Tabla 14. Escurrimiento de las cuencas Tancitaro y la Culebra.

Año	m ³
1974	32'461,230.0
2000	30'640,868.8
2014	30'472,510.8

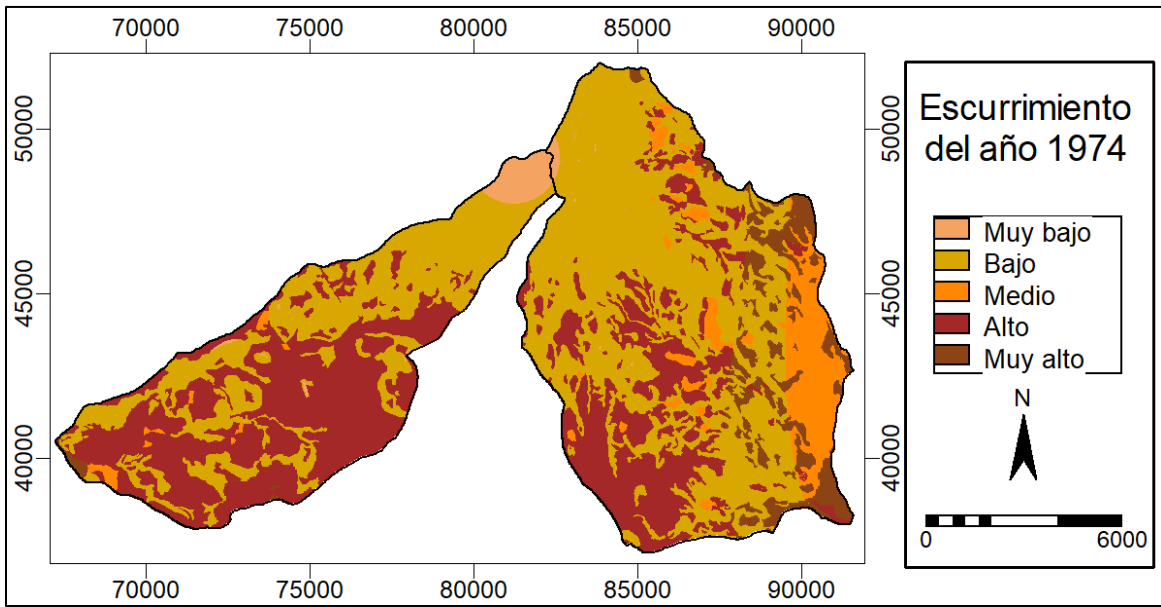


Figura 22. Mapa de escurrimiento potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra para el año 1974

Los escurrimientos de la clase alto se corresponden con los cultivos de temporal y ocupan 34.9% del área. Los escurrimientos de clase bajo están principalmente en los distintos tipos de bosques y ocupan el 50.8% del área.

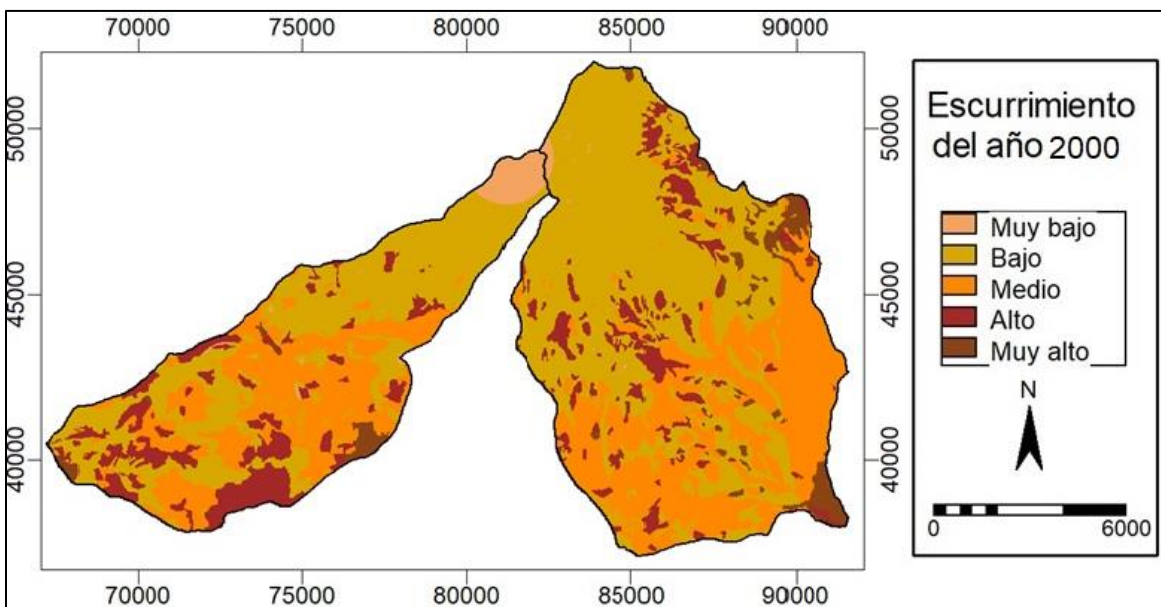


Figura 23. Mapa de escurrimiento potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra para el año 2000

Los escurrimientos de clase bajo están en el 50.8% del área, los de clase medio en el 32.4 % y los altos en el 11.8 %.

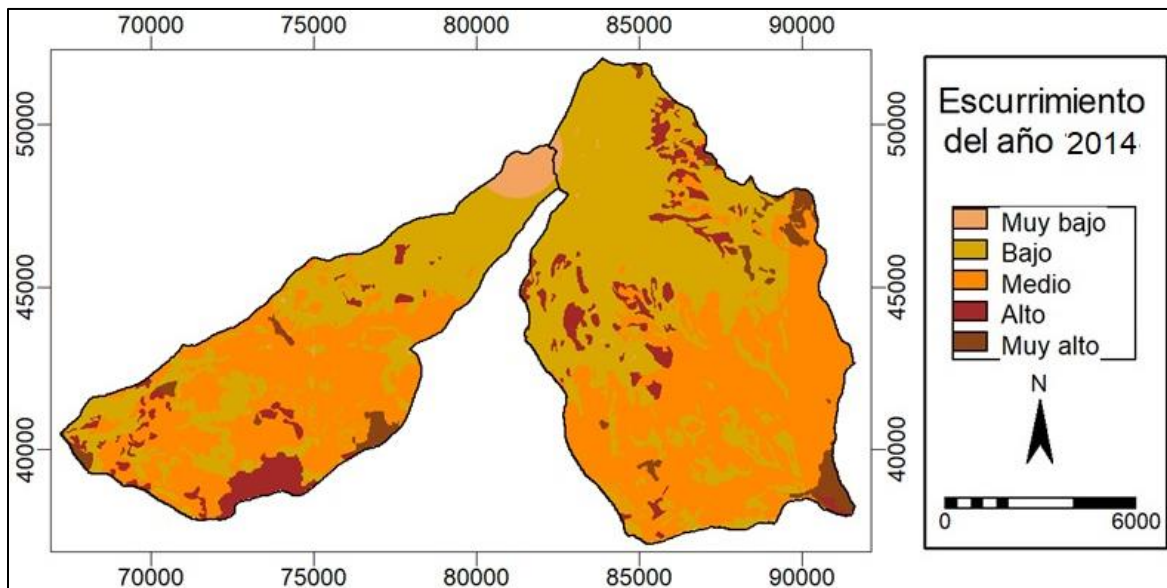


Figura 24. Mapa de escurrimiento potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra para el año 2014

La mayoría del área tiene escurrimientos de las clases bajo y medio, que abarcan el 45.8% y el 43.1% respectivamente.

Las áreas donde disminuyó el escurrimiento corresponden en su mayor parte, donde hubo cambio en la cubierta de cultivos de temporal a cultivos permanentes. En la parte alta de las cuencas no hubo cambios en el escurrimiento.

La correlación de las cubiertas con el escurrimiento resultó para los tres años de 0.8

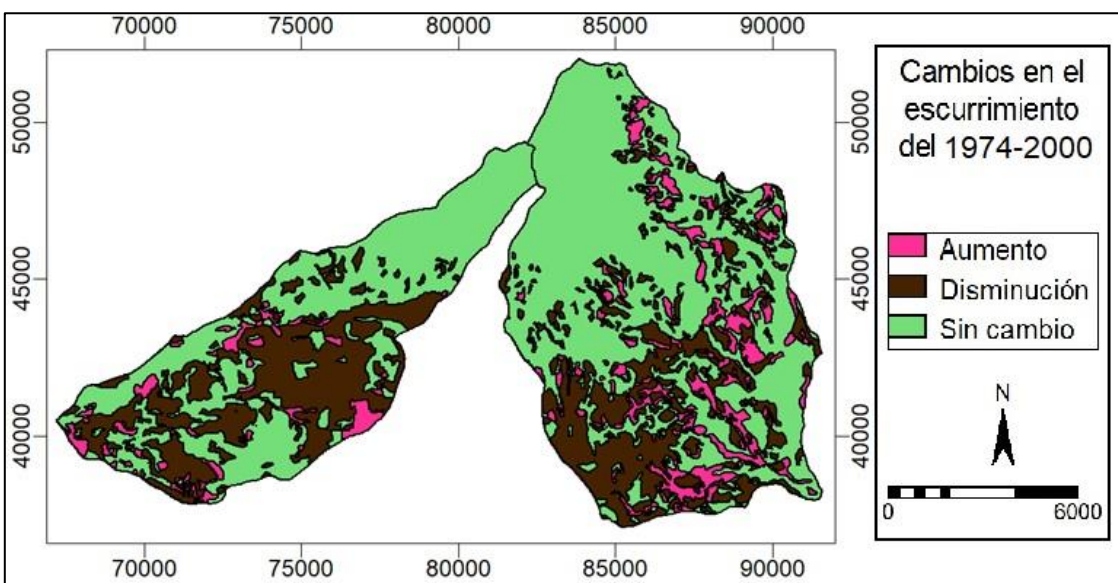


Figura 25. Mapa cambios en el escurrimiento potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra de 1974 a 2000.

De 1974 al 2000 el escurrimiento disminuyó en 277,969.2 m³ en un 28.5 % del área en las partes media y baja, y aumentó 357,445.9 m³ en un 10.1% del área.

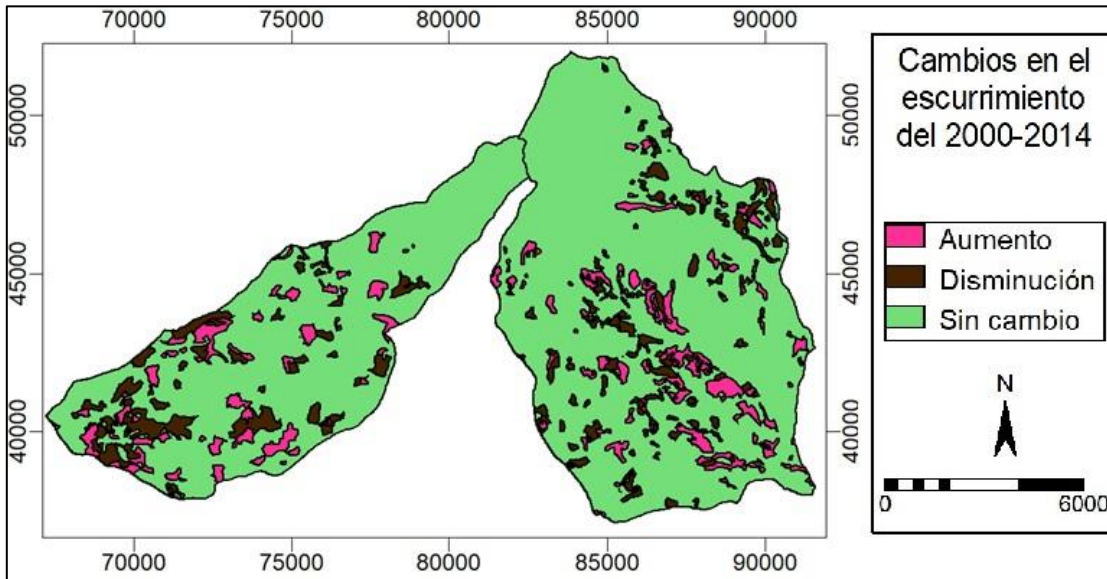


Figura 26. Mapa cambios en el escurrimiento potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra del 2000 a 2014.

Durante el 2000 al 2014 el escurrimiento disminuyo en 536,221.5 m³ y aumento 367,591.9 m³, ambos cambios se dieron en la misma cantidad de área 7.9%.

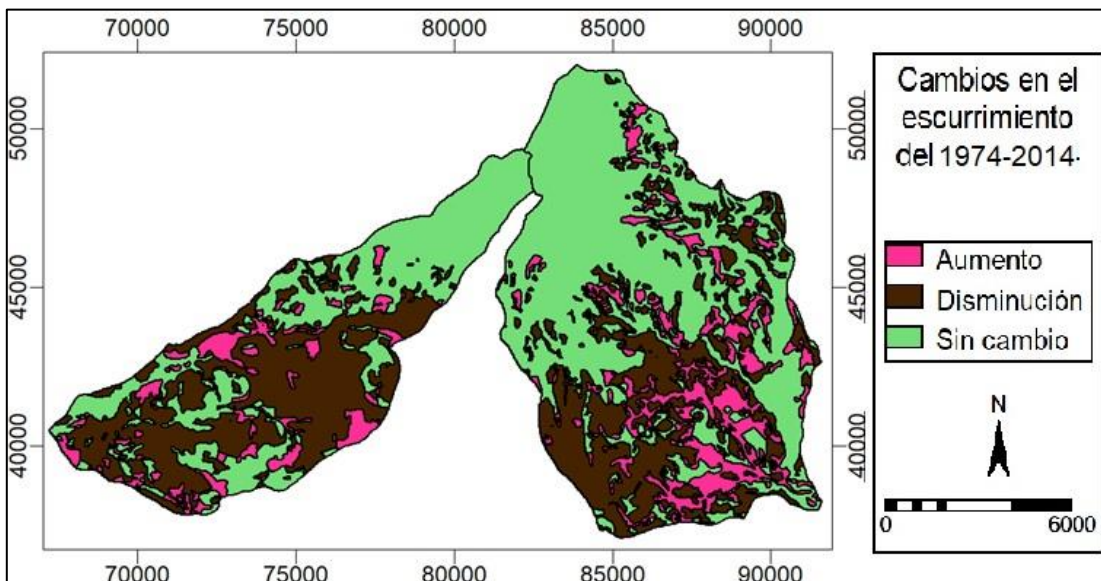


Figura 27. Mapa cambios en el escurrimiento potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra de 1974 a 2014.

De 1974 al 2014 el escurrimiento disminuyo 2'540,415.6 m³ en el 33.9% del área y aumento 551,265.9 m³ en 14.4% del área.

Estimación de la infiltración potencial

En cuanto a la infiltración, esta aumentó en cada año, en concordancia con lo obtenido en el escurrimiento, resultando del modo que se muestra a continuación:

Tabla 15. Infiltración de cada año

Año	m ³
1974	9'130,195.2
2000	10'950,381.4
2014	11'119,008.1

La infiltración es más grande en la parte alta de las cuencas, abarcando los bosques de pino *hartwegii*, de abeto y de pino-encino, la clase alta de infiltración se encontró en las partes media y baja de las cuencas, pero sobre el bosque de pino encino y los cultivos permanentes, en los otros tipos de cubierta esta la clase baja, independientemente de donde se ubiquen en las cuencas.

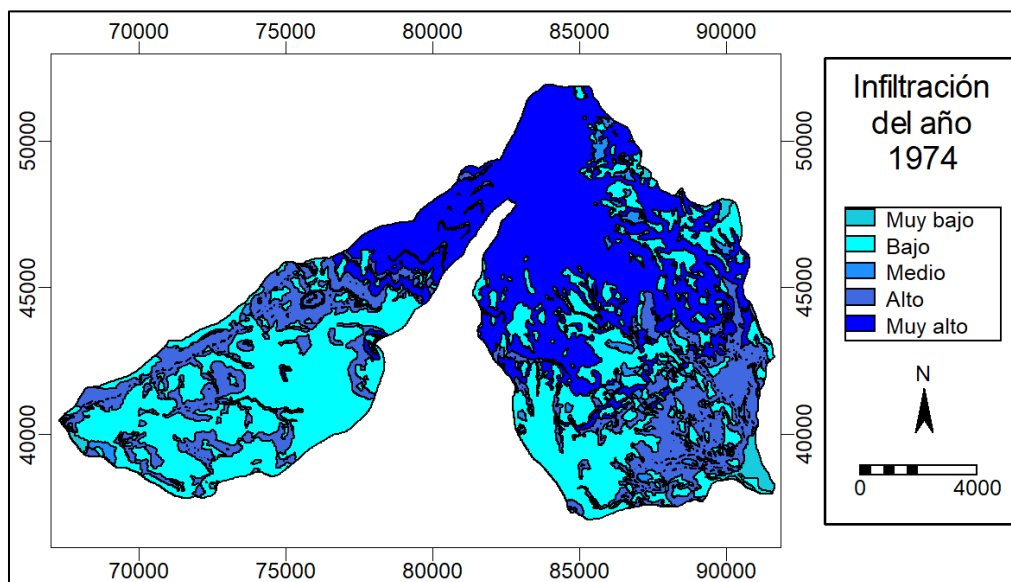


Figura 28. Mapa de infiltración potencial en las cuencas Tancitaro y La Culebra para el año 1974.

En el año 1974 la clase baja de infiltración ocupa un 39% del área, la clase muy alta un 35.1% y la clase alta 22.7%.

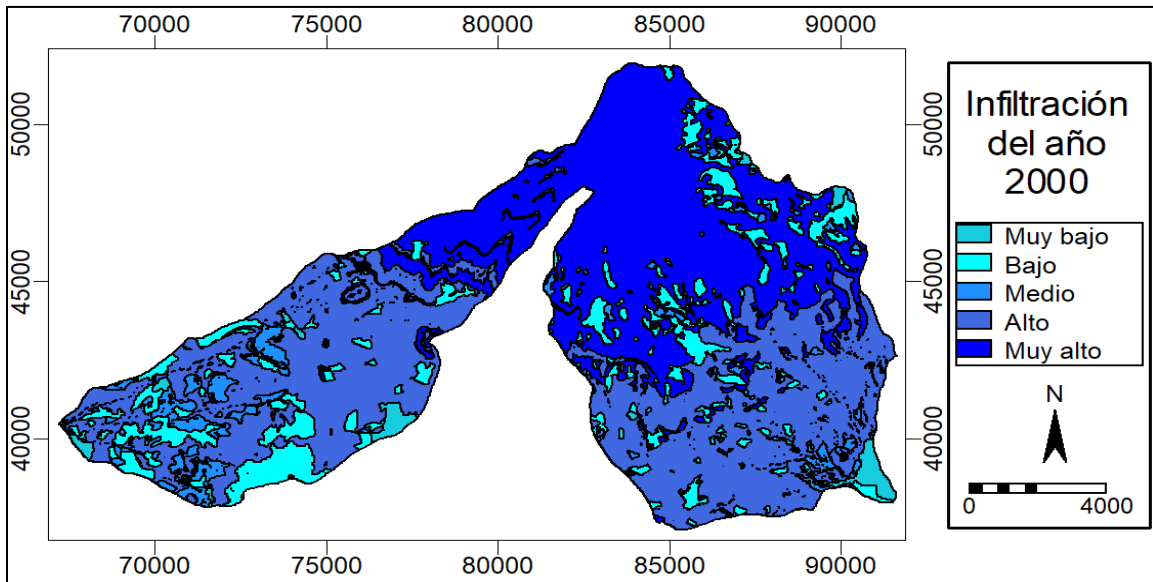


Figura 29. Mapa de infiltración potencial en las cuencas Tancitaro y La Culebra para el año 2000.

La zona de la clase de infiltración alta abarca 44.6% del área, la clase muy alta 35.9% y la clase baja 12.9%.

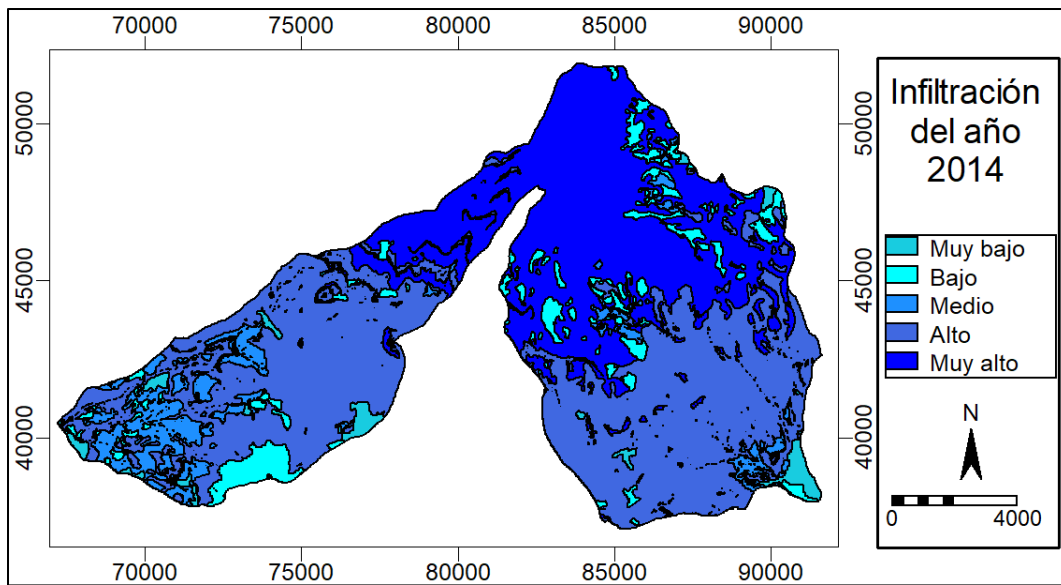


Figura 30. Mapa de Infiltración potencial en las cuencas Tancitaro y La Culebra para el año 2014.

Las clases de infiltración alta y muy alta ocupan casi toda el área con el 48.8% y el 34.5% respectivamente.

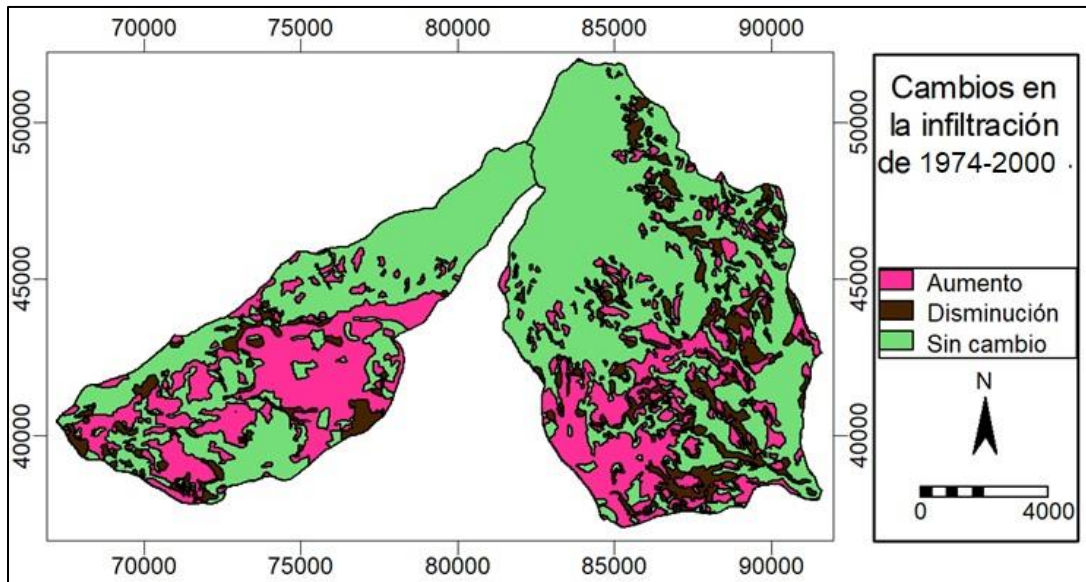


Figura 31. Mapa cambio de la infiltración potencial de las cuencas Tancítaro y La Culebra de 1974 a 2000.

De 1974 al 2000 la infiltración aumentó 2'177,326.5 m³ en 28.5% del área, especialmente en las partes bajas de las cuencas y disminuyó 357,096.8 m³ en 10.1% del área.

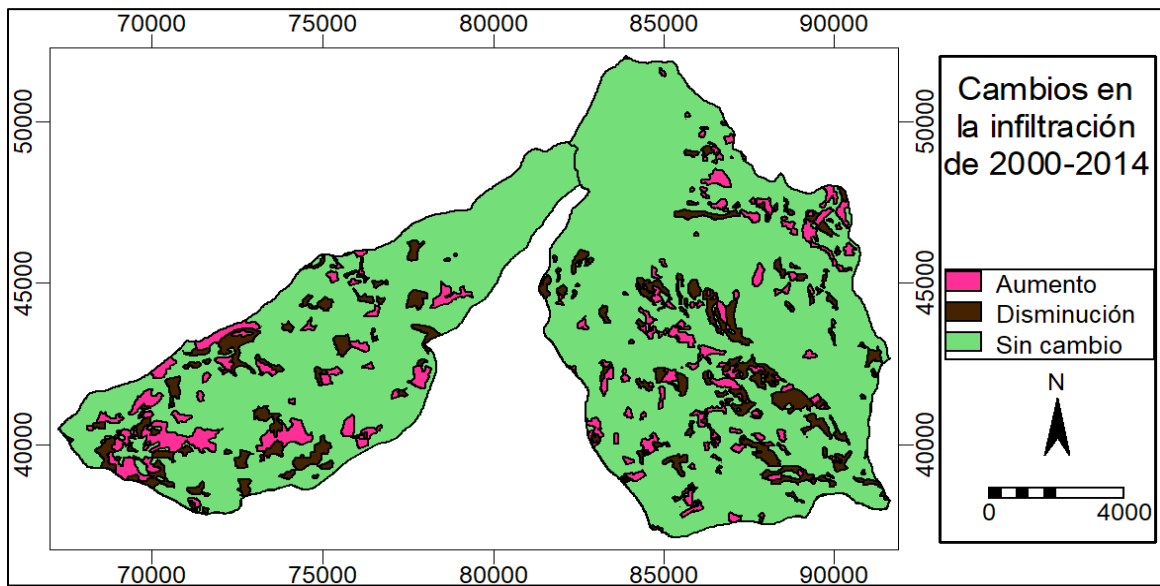


Figura 32. Mapa cambio de la infiltración potencial en las cuencas Tancítaro y La Culebra de 2000 a 2014.

Del 2000 al 2014 la infiltración aumentó 536,128.2 m³ en 7.9% del área y disminuyó 367,543.4 m³ también en 7.9% del área, cambios que estuvieron dispersados por las cuencas.

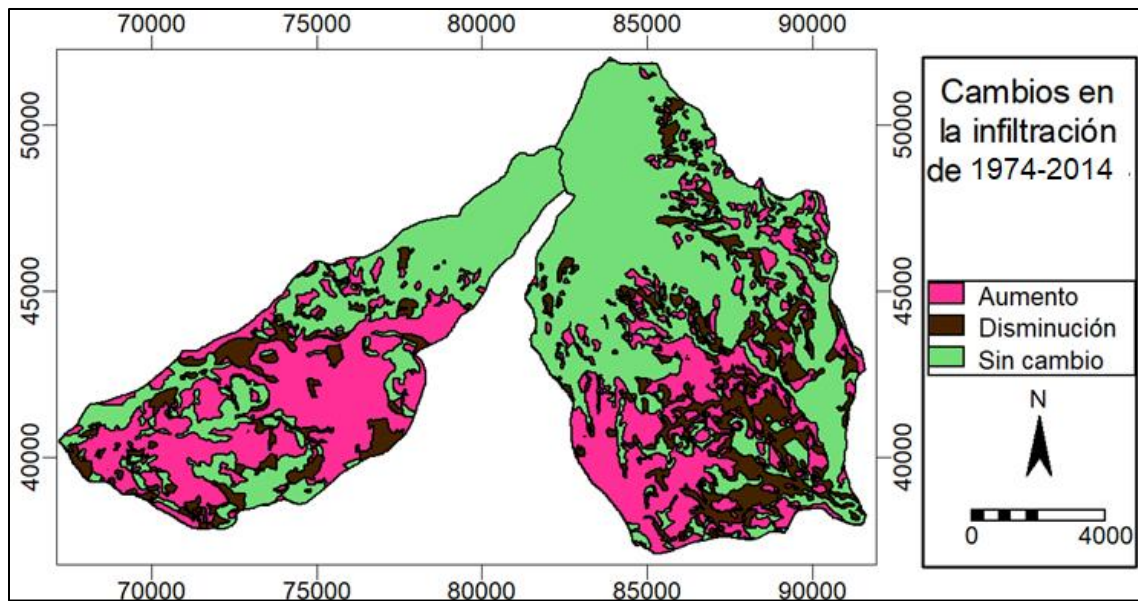


Figura 33. Mapa cambio de la infiltración potencial en las cuencas Tancítaro y La Culebra de 1974 a 2014.

De 1974 al 2014 la infiltración aumentó en 25,639,774.7 m³ en 33.9% del área y disminuyó 550,964.0 m³ en el 14.4%.

La correlación simple de las cubiertas con la infiltración resultó para el 2014 de 0.9, para el 2000 fue igual de 0.9 y para 1974 fue de 0.7.

Cuenca Tancítaro

Estimación del escurrimiento potencial

En la cuenca Tancítaro los valores estimados del escurrimiento fueron disminuyendo en cada año.

Tabla 16. Escurrimiento de la cuenca Tancítaro

Año	m ³
1974	12'840,656.1
2000	11'804,327.5
2014	11'680,021.1

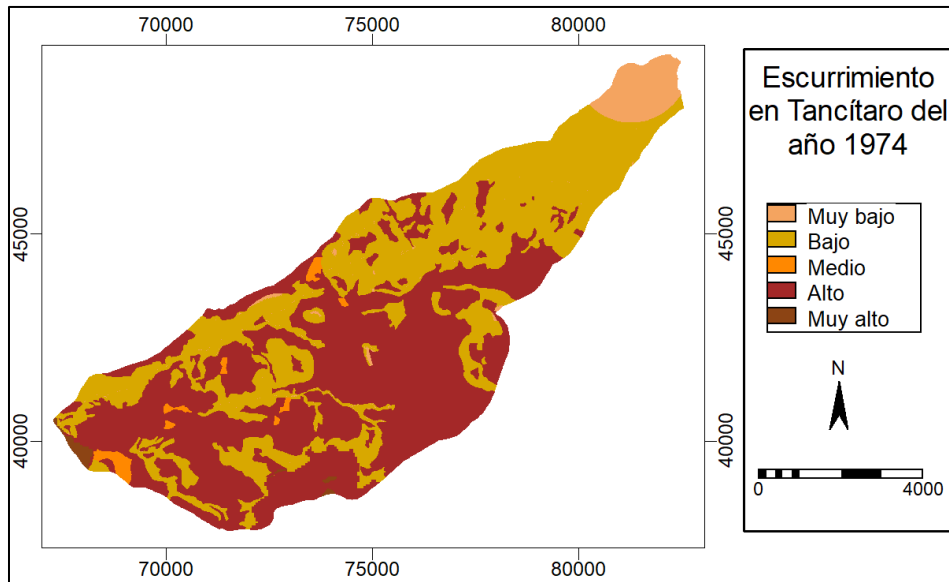


Figura 34. Mapa de escurrimiento potencial en la cuenca Tancitaro para el año 1974.

La mayoría de los escurrimientos se clasificaron como altos o bajos, con 52.4% y 41.9% del área respectivamente.

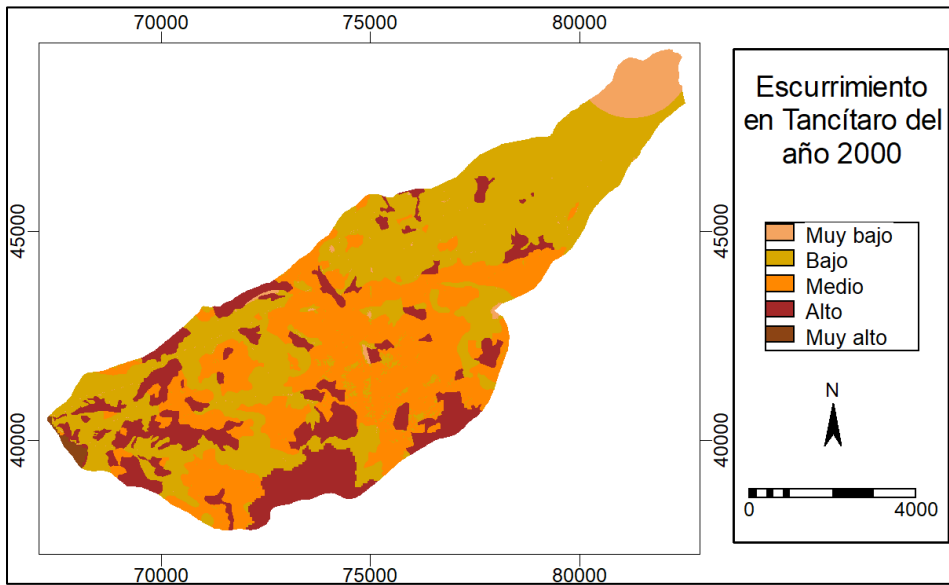


Figura 35. Mapa de escurrimiento potencial en la cuenca Tancitaro para el año 2000.

Los escurrimientos de la clase baja ocupan un 46% de la cuenca, mientras que los de clase media 32.3% y los de la clase alta 17.3%.

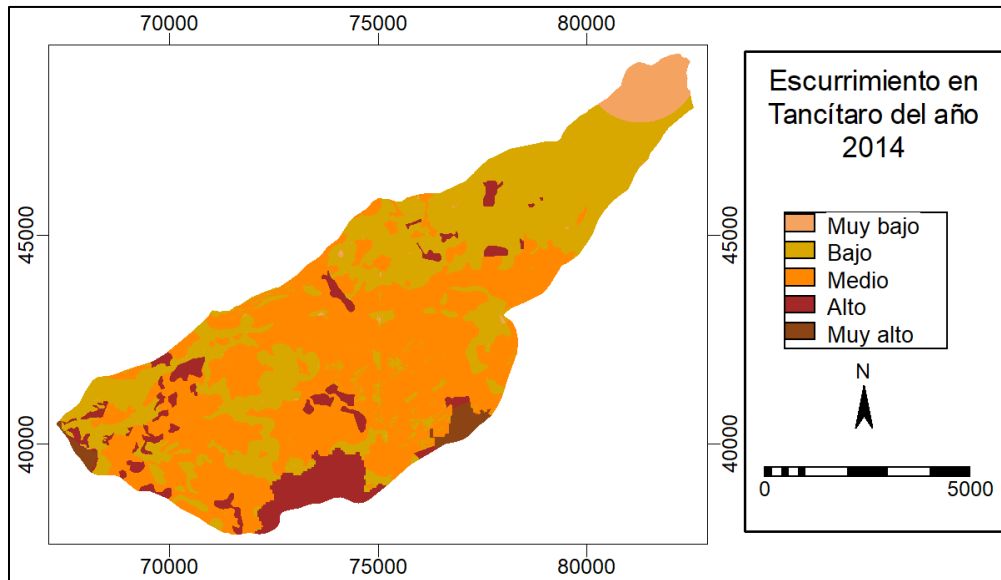


Figura 36. Mapa de escurrimiento potencial en la cuenca Tancítaro para el año 2014.

Dominan los escurrimientos medios y bajos ocupando 46.4% y 40.1%, respectivamente, de la cuenca.

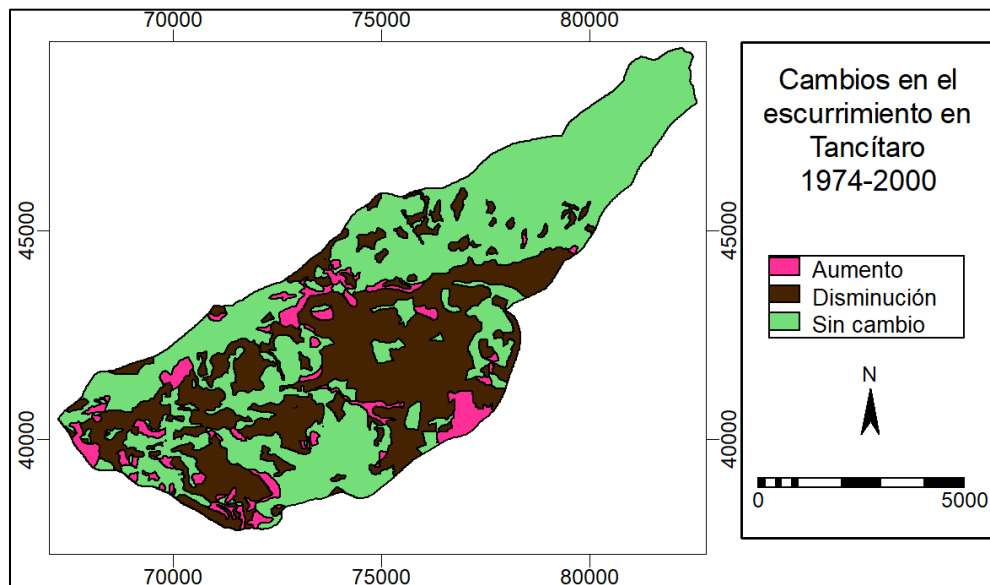


Figura 36. Mapa de cambios en el escurrimiento potencial 1974-2000 en la cuenca Tancítaro.

De 1974 al 2000 el escurrimiento disminuyó 1'126,172.2 m³ en 37% del área de la cuenca, mayormente en la parte media, y aumentó 89,817.5 m³ en 7% del área.

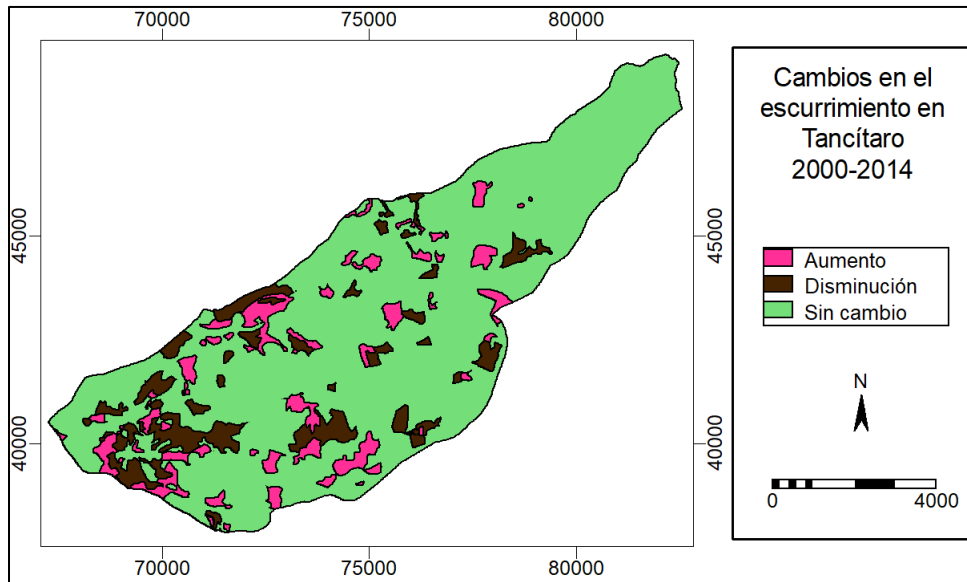


Figura 37. Mapa de cambios en el escurrimiento potencial 2000-2014 en la cuenca Tancítaro.

Del 2000 al 2014 el escurrimiento disminuyó 265,623.6 m³ en 9.7% del área y aumentó 141,270.5 m³ en 8.5% del área.

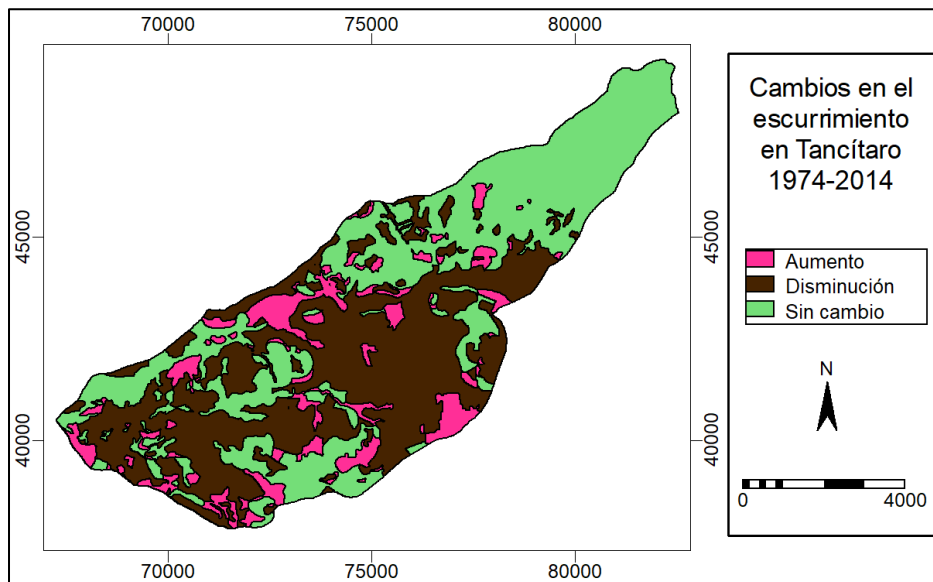


Figura 38. Mapa de cambios en el escurrimiento potencial 1974-2014 en la cuenca Tancítaro

De 1974 al 2014 el escurrimiento disminuyó 1'331,987.9 m³ en 45.1% del área, abarcando de la parte baja y media de la cuenca, el escurrimiento aumentó en 171,272.1 m³ en 11.9 % del área.

Estimación de la infiltración potencial

La infiltración fue aumentando en cada año, pasando de 3 millones de m³ a poco más de 4 millones de m³ potencialmente disponibles.

Tabla 17. Infiltración de la cuenca Tancítaro

Año	m ³
1974	3'003,911.9
2000	4'040,125.7
2014	4'164,520.5

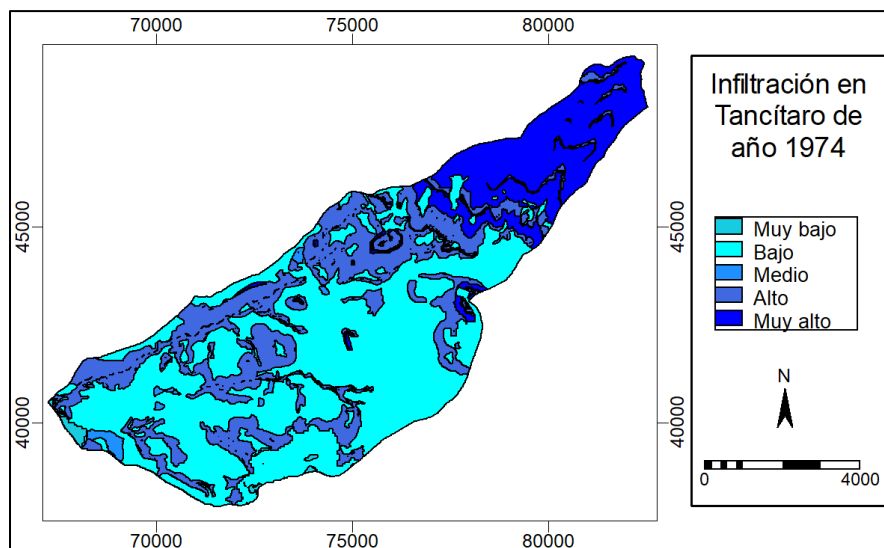


Figura 39. Mapa de infiltración potencial en la cuenca Tancítaro para el año 1974.

La mayor parte de la infiltración fue de clase baja en el 52.3% de la cuenca, la infiltración de clase alta ocupa 29% del área y la clase muy alta 17.1%.

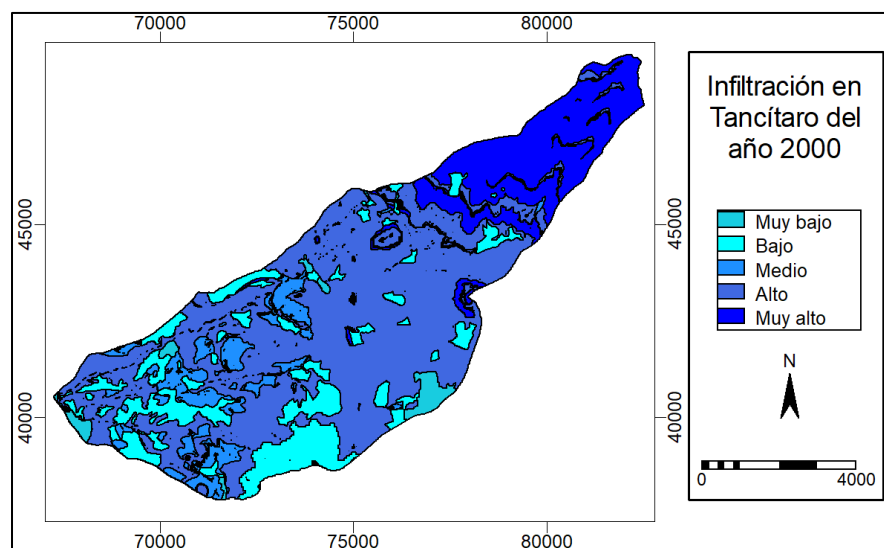


Figura 40. Mapa de infiltración potencial de la cuenca Tancítaro para el año 2000.

La mayor parte de la infiltración fue de clase alta que ocupa 56.5% del área, la clase muy alta ocupa el 17.6% y la clase baja el 15.5% de la cuenca.

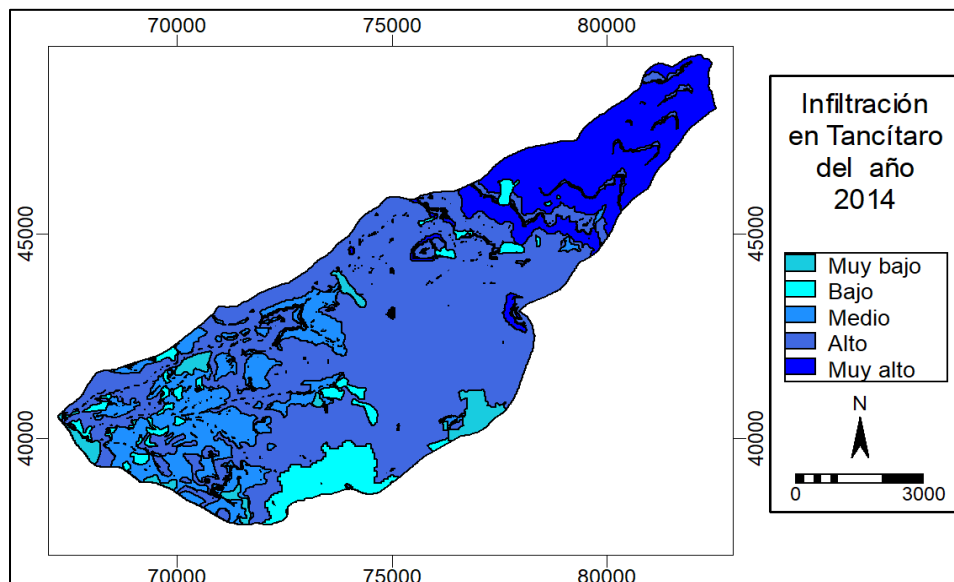


Figura 41. Mapa de infiltración potencial de la cuenca Tancitaro para el año 2014.

La mayoría de la infiltración fue de clase alta con 58.5% del área, seguida de la clase muy alta con 17.2% y la clase media con 14.6% de la cuenca.

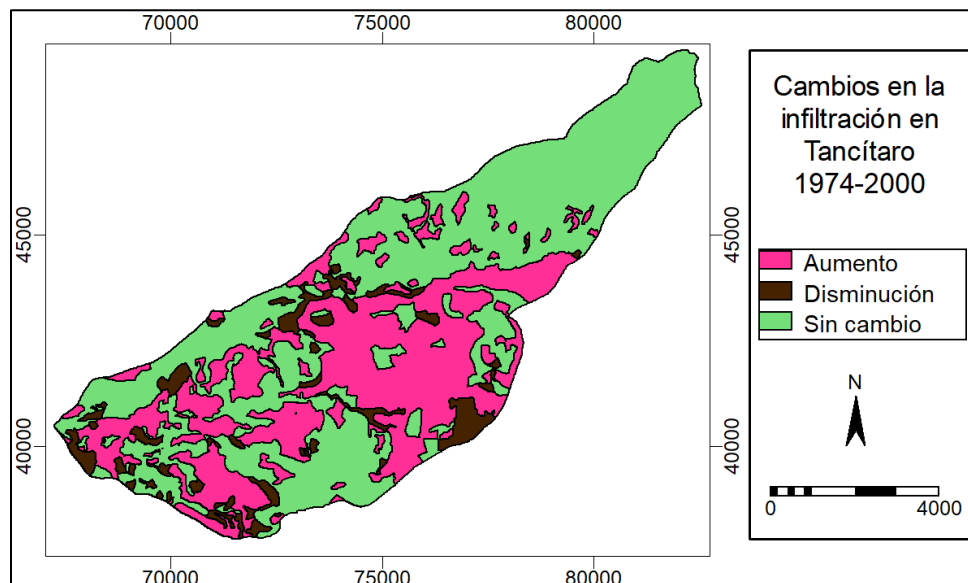


Figura 42. Mapa de cambios en la infiltración potencial 1974-2000 en la cuenca Tancitaro.

De 1974 al 2000 la infiltración aumentó 1'126,017.4 m³ en 37% del área y disminuyó 89,810.7 m³ en 7% de la cuenca.

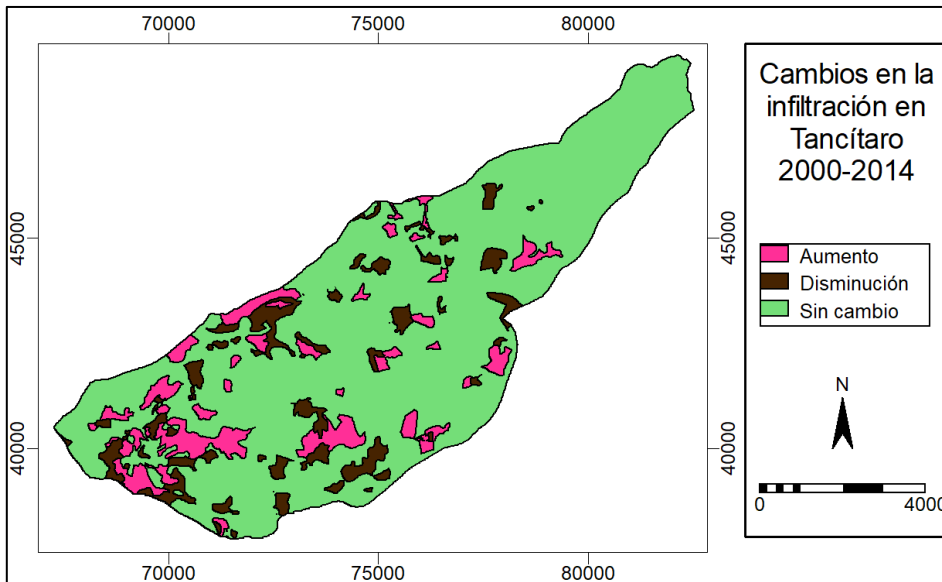


Figura 43. Mapa de cambios en la infiltración potencial 2000-2014 en la cuenca Tancítaro.

Del 2000 al 2014 la infiltración aumentó 265,622.4 m³ en 9.7% de la cuenca y disminuyó 141,242.2 m³ en 8.5% del área.

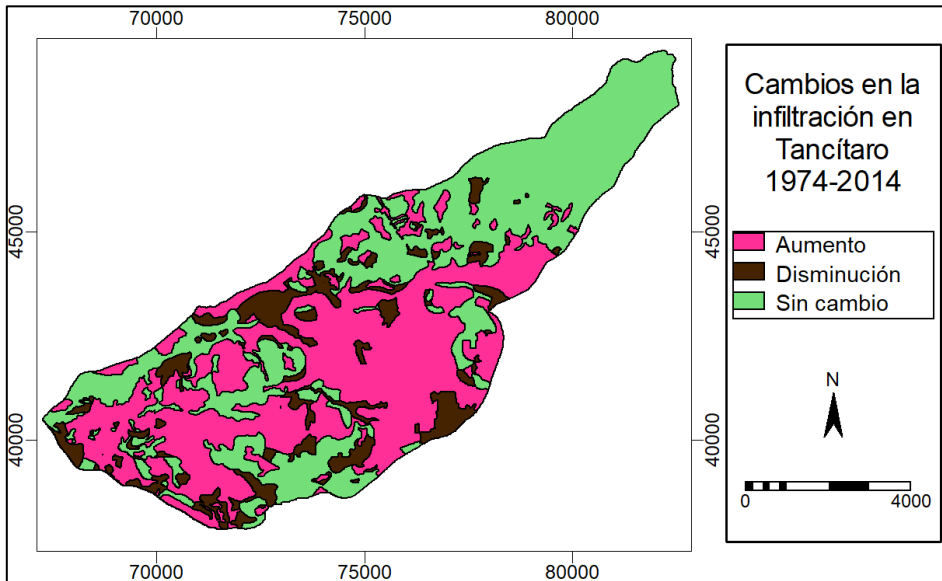


Figura 44. Mapa de cambios en la infiltración potencial 1974-2014 en la cuenca Tancítaro.

De 1974 al 2014 la infiltración aumentó 1'331,836.2 m³ en 45.1% del área, cubriendo en su mayoría las partes baja y media de la cuenca, y disminuyó 171,241.2% en el 11.9% de la cuenca

Cuenca La Culebra

Estimación del escurrimiento potencial

Para la cuenca La Culebra el escurrimiento disminuyó en poco más de un millón de m³.

Tabla 18. Escurrimiento de la cuenca La Culebra

Año	m ³
1974	19'620,573.8
2000	18'836,541.4
2014	18'792,489.7

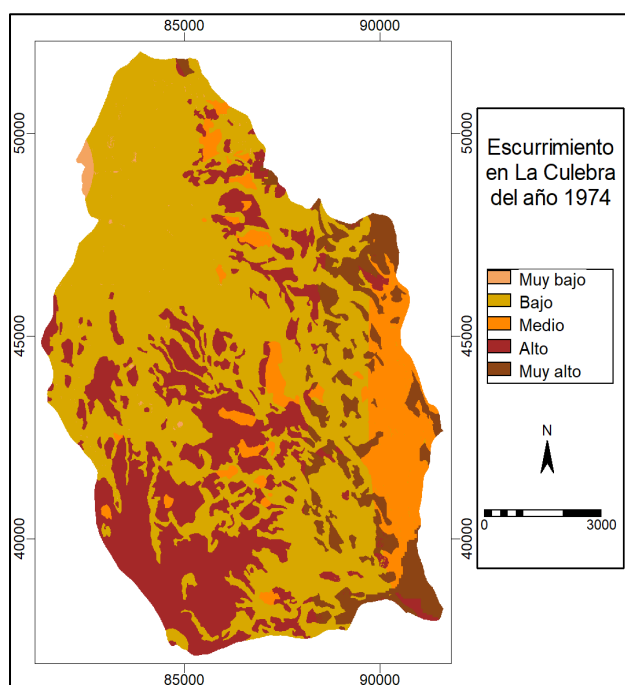


Figura 45. Mapa de escurrimiento potencial de la cuenca La Culebra para el año 1974.

La mayor parte del escurrimiento es de clase bajo en 57.2% de la cuenca, los escurrimientos de clase alto ocupan un 24.4%.

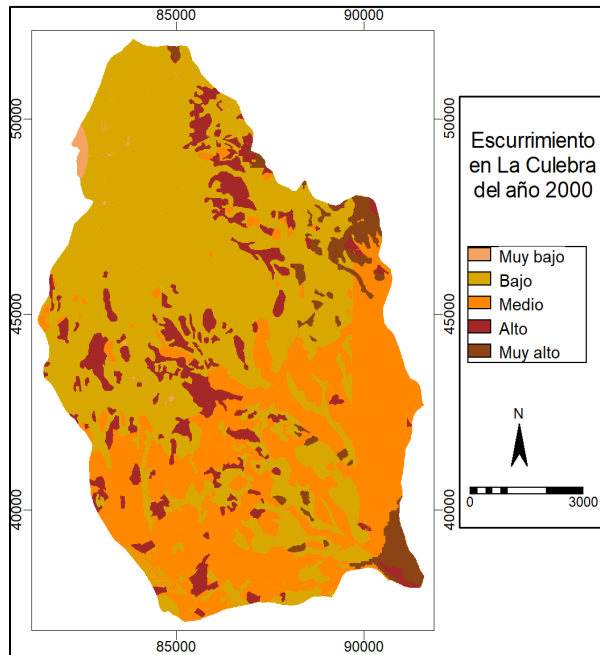


Figura 46. Mapa de escurrimiento potencial en la cuenca La Culebra para el año 2000.

Los escurrimientos de clase bajo siguen dominando al ocupar un 54.5% de la cuenca, pero aumentan los escurrimientos de clase medio ocupando 32% del área.

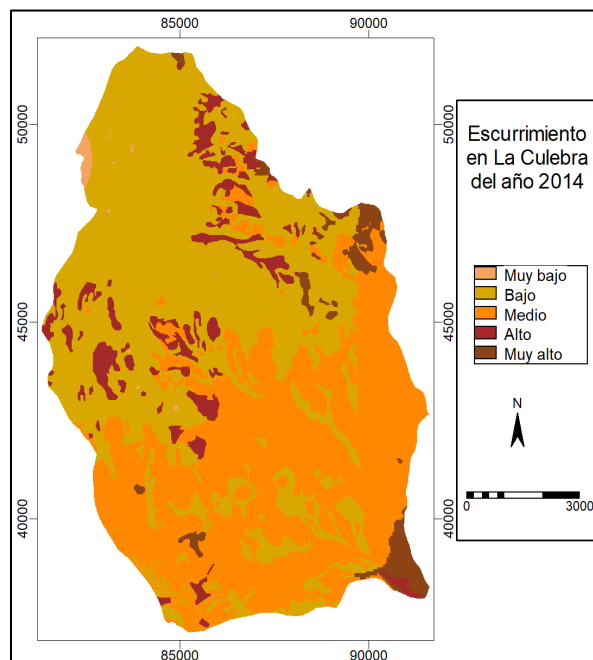


Figura 47. Mapa de escurrimiento potencial en la cuenca La Culebra para el año 2014.

La mayor parte de la cuenca tuvo escurrimientos de las clases bajo y medio con 49.9% y 40.5% del área respectivamente.

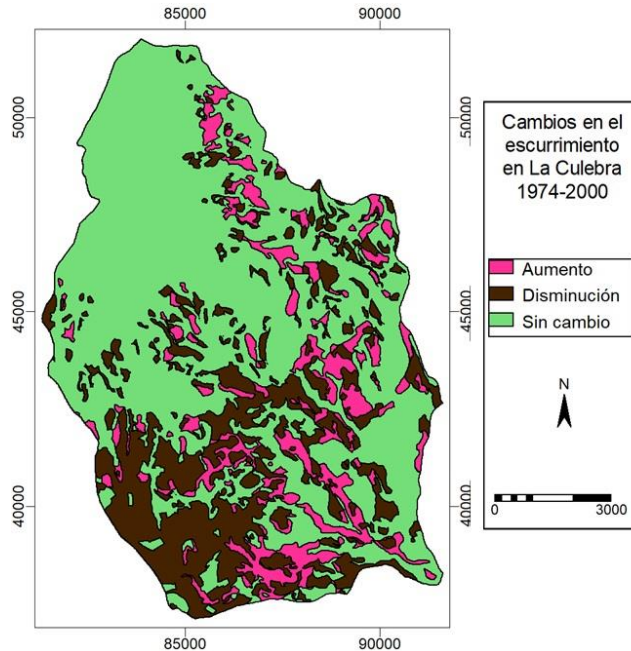


Figura 48. Mapa de cambios en el escurrimiento potencial 1974-2000 en la cuenca La Culebra.

De 1974 al 2000 el escurrimiento disminuyó 1'051,700.6 m³ en 23% del área, especialmente en el suroeste de la cuenca y aumentó 267,608.2 m³ en 12% del área.

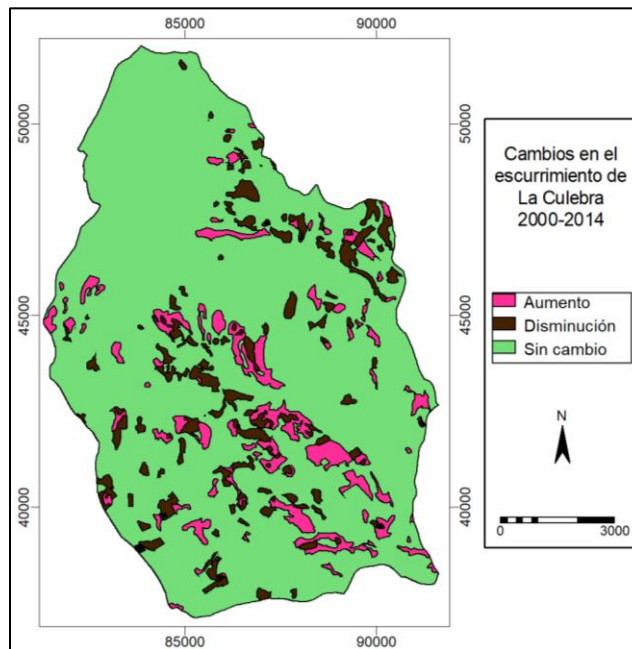


Figura 49. Mapa de cambios en el escurrimiento potencial 2000-2014 en la cuenca La Culebra.

De 2000 al 2014 el escurrimiento disminuyó 270,567.3 m³ en 6.7% del área de la cuenca y aumentó 226,312.2 m³ en 7.4% del área, principalmente hacia la mitad de la cuenca.

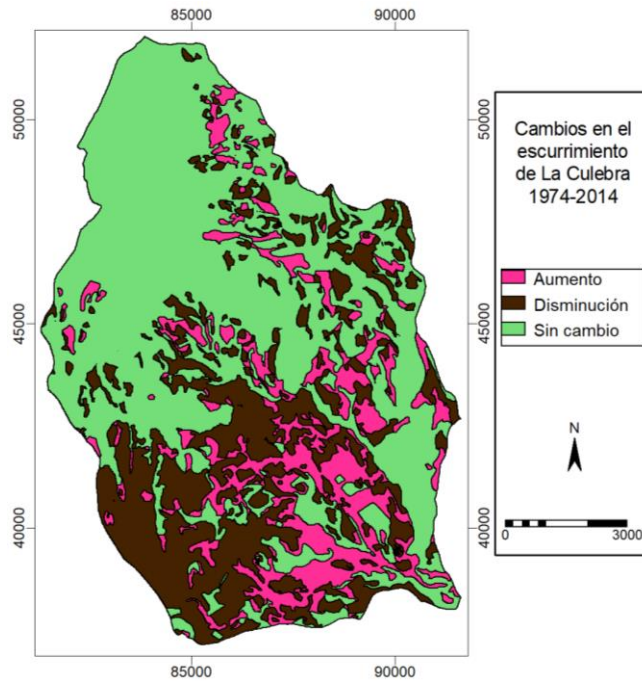


Figura 50. Mapa de cambios en el escurrimiento potencial de 1974-2014 en la cuenca La Culebra.

De 1974 al 2014 el escurrimiento disminuyó 1,208,324.9 m³ en 26.8% del área de la cuenca y aumentó 379,977.4 m³ en 15.9% del área

Estimación de la infiltración potencial

La infiltración aumentó en poco más de 800,000 m³ de 1974 al 2014, y fue aumentando en cada fecha.

Tabla 19. Infiltración en la cuenca La Culebra

Año	m ³
1974	6'126,283.2
2000	6'910,255.6
2014	6'954,487.5

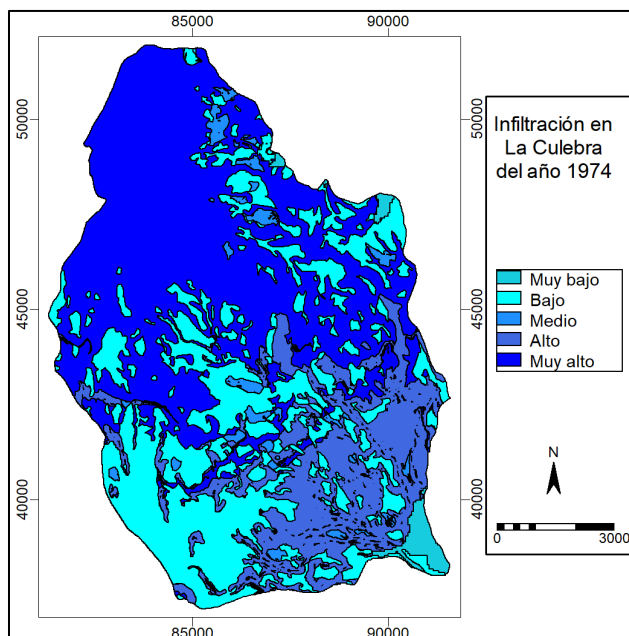


Figura 51. Mapa de infiltración potencial en la cuenca La Culebra para el año 1974. La infiltración de clase muy alta ocupa el 46.7% de la cuenca, la clase baja 30.5% y la clase alta 18.7%.

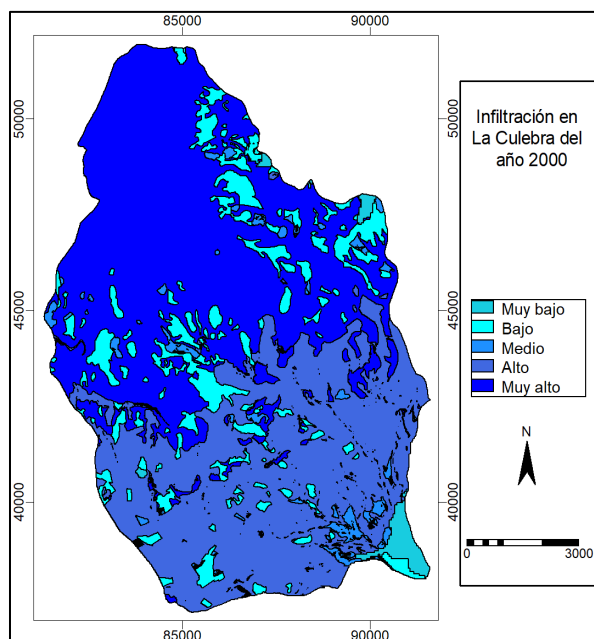


Figura 52. Mapa de infiltración potencial de la cuenca La Culebra para el año 2000.

La infiltración de clase alta domina la cuenca, la clase muy alta ocupa el 47.7% del área, la clase alta ocupa el 37%, en cambio la clase baja ocupa 11.2% del área.

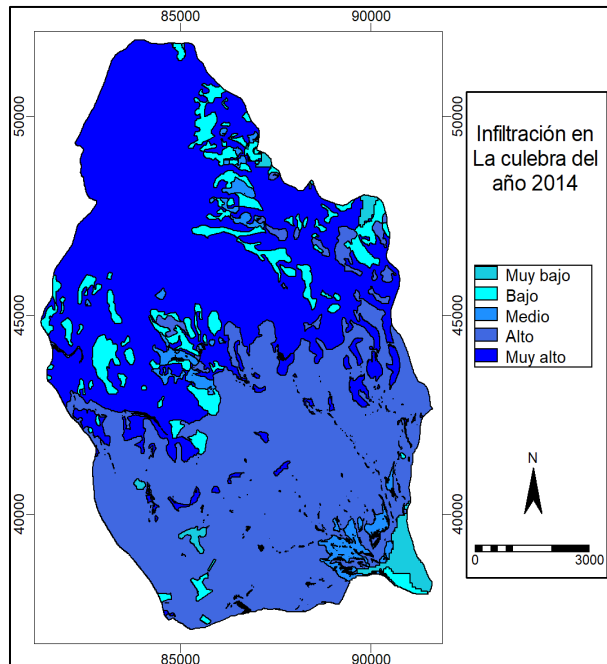


Figura 53. Mapa de infiltración potencial de la cuenca La Culebra para el año 2014.

La mayor parte de la cuenca tiene una infiltración de clases alta y muy alta con el 42.5% y 45.5% del área.

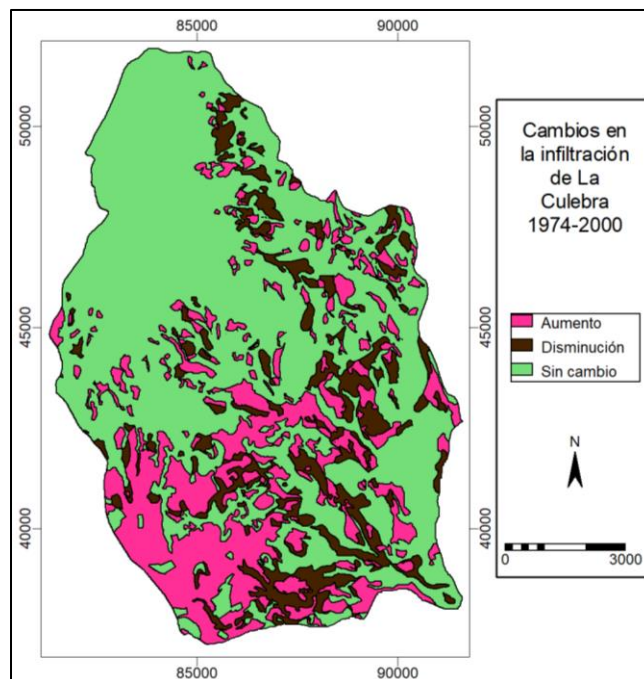


Figura 54. Mapa de cambios en la infiltración potencial 1974-2000 en la cuenca La Culebra.

De 1974 al 2000 la infiltración aumentó 1'051,217.2 m³ hacia el suroeste de la cuenca y disminuyó 267,268.7 m³.

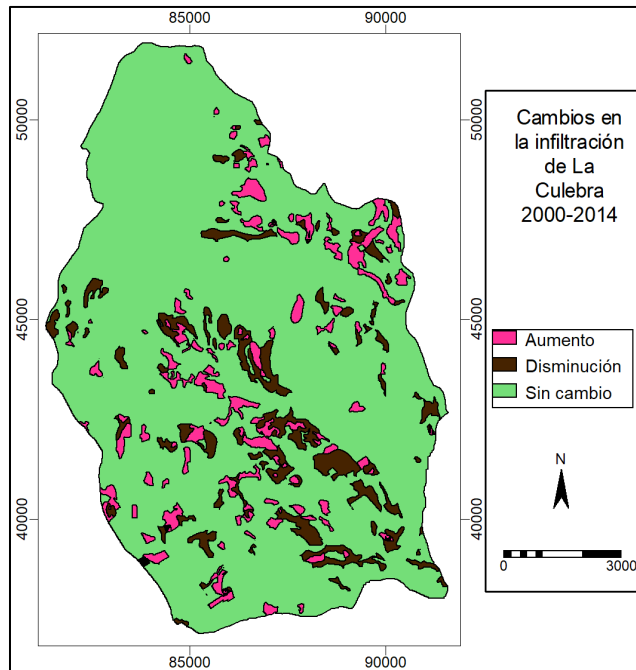


Figura 55. Mapa de cambios en la infiltración potencial 2000-2014 en la cuenca La Culebra.

Del 2000 al 2014 la infiltración aumentó 270,477.6 m³ y disminuyó 379,708.2 m³, especialmente en la parte central de la cuenca.

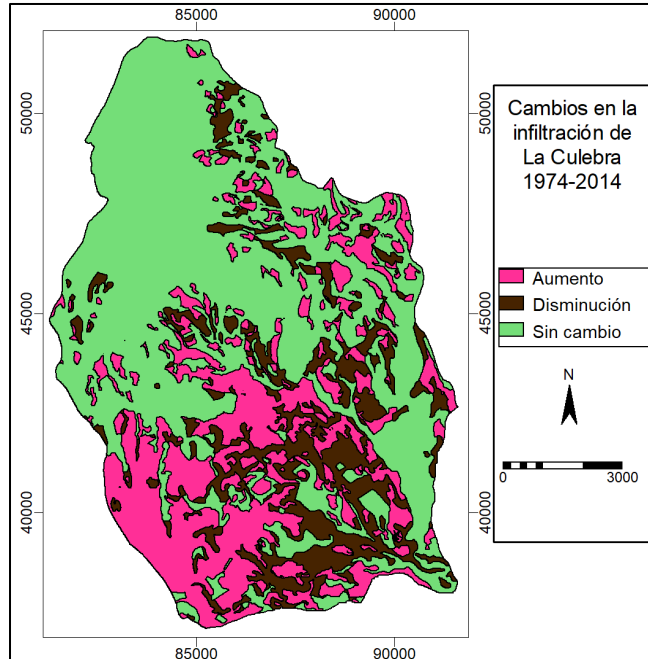


Figura 56. Mapa de cambios en la infiltración potencial 1974-2014 en la cuenca La Culebra.

De 1974 al 2014 la infiltración aumentó 1'207,841.5 m³ y disminuyó 379,708.2 m³.

Capítulo 5

Discusión

“El cultivo de huertas de aguacate ha originado cambios profundos en la cultura agrícola de esta región aguacatera, ya que áreas anteriormente sembradas con maíz por debajo de los 1,800 msnm, fueron ocupadas paulatinamente por huertos de aguacate” (Bravo, et al, 2009, pp. 3). Por ejemplo, Bravo-Espinosa, *et al*, (2012) observaron una conversión de cultivos de maíz y frijol de temporal a huertas de aguacate, en la subcuenca del río Cupatitzio, vieron que de 2003 a 2008 hubo un cambio en 73.8% del área de cultivos anuales a cultivos de aguacate.

Como se ha reportado en otras partes de la región, el principal cambio ocurrido en las cuencas Tancítaro y La Culebra es el aumento de los cultivos permanentes, los cuales pasan de 292.9 ha en 1974, a 6,883.5 ha en 2014. Esto no es extraño debido a que las cuencas se encuentran en medio de la zona aguacatera de Michoacán, en donde con la introducción del cultivo de aguacate a partir de los años 70, este tipo de cultivos permanentes aumentó mucho, en hasta 500% (Ramírez y Morales, 2009).

En un primer periodo, de 1974 al 2000, los cultivos permanentes avanzaron principalmente sobre los cultivos de temporal, es decir, en áreas que ya eran usadas para agricultura. De esta manera se ve que en el año 2000 el área ocupada por el cultivo de temporal se reduce, específicamente en la cuenca Tancítaro se reduce a 8% y en la cuenca La Culebra a 6%.

Bravo-Espinosa, *et al* (2012) encontraron que durante el periodo de 1975 a 2008 la agricultura se incrementó a una tasa de 7.8%, pero en el periodo de 2003 a 2008, la tasa de expansión fue de 3.2%. En las cuencas Tancítaro y La Culebra, hacia el 2014 la tasa de crecimiento anual de los cultivos permanentes decae. Además, en esta fecha la mayor parte de los cultivos de temporal ya se habían convertido en cultivos permanentes, de manera que el área que ocupan los cultivos de temporal es mínima, lo que ocasiona que el avance de los cultivos permanentes sea sobre el bosque de pino-encino, principalmente en el bosque aledaño a las zonas agrícolas, haciendo más uniforme la cubierta de cultivos permanentes.

Los bosques de abeto y de pino *hartwegii* no tuvieron grandes cambios, a excepción de la aparición de la cubierta de bosque de *abies* y pino *hartwegii*, la cual creció sobre el pino *hartwegii*. Una de las razones por la que estos bosques no fueron deforestados, puede ser a que este tipo de bosques se encuentran a una altitud mayor a 3000 msnm, donde el aguacate no puede desarrollarse, pues este árbol sólo puede cultivarse desde el nivel del mar hasta los 2,500 msnm (Infoagro, s.f).

Por otro lado, a estas altitudes mayores, los cultivos de temporal y pastizales fueron abandonados en su mayoría. Se observó que, en 1974, junto al bosque de abeto había diversos polígonos de cultivos de temporal, pastizales y matorrales, pero hacia el 2000 disminuyen los cultivos de temporal y los pastizales, y aumentan los matorrales en esta zona, además los matorrales se mantienen estables en estas zonas altas en el 2014. Lo cual se había reportado previamente por Bravo-Espinosa, *et al*, (2012) quienes indicaron que la revegetación forestal tuvo lugar principalmente en las elevaciones altas y medias, en la subcuenca del río Cupatitzio, Michoacán.

En el área de estudio, para ambas cuencas, se observa que de 1974 al 2000 la deforestación y la recuperación son casi iguales, ya que mientras el cultivo de aguacate se desarrolla, la agricultura de temporal es abandonada dando paso a los matorrales o bosque de pino encino. Este cambio se dio principalmente en la parte alta de la cuenca La Culebra y en la parte baja de la cuenca Tancítaro; además, 66.3% de estas zonas abandonadas no vuelven a ser utilizadas.

Sin embargo, para el 2014 la deforestación es mucho mayor que la recuperación, debido a que se empieza a talar más bosque de pino-encino para poner huertas de aguacate. Entre el 2000 y 2014 la recuperación fue mínima debido a que la mayoría de los cultivos de temporal y pastizales ya habían cambiado a otras cubiertas, ya fuera a cultivos permanentes o bosque. Mientras que la deforestación mantuvo tasas parecidas a las del periodo 1974-2000, por lo que tenemos que de 1974 a 2014, el área deforestada fue más del doble (13.7%) que el área recuperada (5.8%) en ambas cuencas.

La tasa de deforestación en las cuencas Tancítaro y La Culebra es de 0.44%, la cual es menor que la reportada para el estado de Michoacán. Bocco, *et al*, (2001) encontraron tasas de deforestación de 1.8% y 1% por año para bosques templados y tropicales respectivamente durante el periodo 1976-1993. Mas, *et al* (2005) identificaron tasas de 0.47% y 0.65% por año durante el periodo 1976-2000. Cuevas García y Priego Santander (2005) encontraron que en Michoacán los bosques se redujeron de 24% a 15% del año 1976 al año 2000. Bravo-Espinosa, *et al*, (2012) obtuvo que en la subcuenca del río Cupatitzio hubo una pérdida del 23% de la cubierta forestal, compuesta por bosques de pino, pino-roble y selva baja.

La forma en la que se comporta la cuenca La culebra es más parecida al área en general, en las gráficas se observan fluctuaciones similares en las distintas cubiertas. Esto puede deberse a que la influencia de la cuenca La Culebra es mayor en el área, ya que la cuenca La Culebra es más grande que la cuenca Tancítaro.

La cuenca La culebra tiene más clases de cubiertas, ya que alcanza mayor altitud abarcando áreas cubiertas por ceniza, pasto de altura y zonas cubiertas por plantaciones forestales, como una acción para recuperar el bosque.

En la cuenca Tancítaro el crecimiento de los cultivos permanentes es más fuerte que en la cuenca La Culebra, en la primera la tasa de cambio de esta cubierta fue

de 13.7%, y para la segunda cuenca fue de 6.7% durante el periodo de 1974 a 2014. La razón de que la presión de los cultivos es más fuerte en la cuenca Tancítaro, es que en la forma de propiedad de la tierra es privada, además de tener centros poblaciones relativamente grandes, las cuales son las poblaciones Tancítaro y Páreo. Aunque estas no se expanden, ya sea por influencia de la migración, o que las casas se construyen en espacios o lotes vacíos dentro de la localidad, es por eso que está cubierta tiene tasas de cambio bajas. Sin embargo, estas poblaciones, especialmente la localidad de Tancítaro, tienen una gran influencia en el uso de los recursos de la cuenca.

La superficie ocupada por la clase de pino-encino en Tancítaro, se incrementó en el año 2000, como consecuencia del abandono de pastizales y de cultivos de temporal, por lo que hay una reducción de las cubiertas de pastos y los cultivos de temporal, en las cuales se recupera el bosque; en el periodo de 1974 al 2000 la superficie que se recuperó alcanzó el 7.8%, ligeramente superior a la superficie deforestada, la cual fue de 6.1% de la cuenca. Pero hacia el 2014 esta situación se invirtió, la superficie de pino-encino decrece rápidamente y cambia hacia aguacate, la deforestación aumentó a 14.3% para el periodo de 2000 a 2014 y la recuperación fue de solo 4.6%

En la cuenca La Culebra el bosque de pino-encino decrece de manera constante, aunque en tasas menores a 0.8%, la deforestación es más alta en el periodo de 1974 a 2000, con 8.4%, que para el periodo de 2000 a 2014, con 6.5% de área deforestada. Lo mismo pasa con la recuperación, que para el primer periodo es de 7.4% y para el segundo periodo es de 1.8%. En esta cuenca se encuentra parte de las tierras de la comunidad de Nuevo San Juan Parangaricutiro, esta comunidad hace un aprovechamiento sustentable de sus bosques, lo que incluye acciones que conservan el bosque, como la reforestación.

En el periodo de 1974 a 2014 ambas cuencas tienen una deforestación similar, siendo en Tancítaro ligeramente mayor con 14.3%, la cuenca La Culebra tuvo un total de 13.3%. En cuanto a la recuperación en la cuenca Tancítaro fue de 4.6%, menor que en la cuenca La Culebra, la cual tuvo 6.5% de área que se convierte en bosque.

Las respuestas hidrológicas en ambas cuencas se ven afectadas por los patrones de cambio de uso de suelo. La respuesta general de las cuencas es una baja en los escurrimientos potenciales y el aumento en la infiltración potencial, principalmente por el efecto que tiene la conversión de cultivos de temporal a permanentes. Vemos que los escurrimientos de la clase media se corresponden con los cultivos permanentes, así que el área de escurrimientos de la clase media aumenta al crecer los cultivos permanentes.

López García, *et al* (2007) encontró en dos cuencas mediterráneas de España, una disminución de los cultivos de secano, al tiempo que hubo un incremento de las zonas dedicadas a cítricos y extensión de los espacios urbanizados. De tal manera

que obtuvo que la superficie que se convierte de secano a cítricos tiene como consecuencia un descenso en la producción de escorrentía.

Morales-Manila y Cuevas-García (2011, pp. 6) dicen que “al menos en las décadas de 1970 a 2000, el impacto ambiental del cultivo de aguacate tuvo un carácter más positivo que negativo, cuando menos a lo referente a la arborización de extensas áreas de cultivos de temporal y de pastizal o matorral, ya que si bien esta arborización no compensa del todo los servicios ambientales de una zona con cubierta forestal, si representa una mejora, en términos hidrológicos y de conservación del suelo, respecto a las áreas de cultivo de temporal y pastizal inducido, aunque el uso intensivo de agroquímicos resta valor a este impacto positivo.”

A nivel regional, la mayor producción de agua más alta se distribuye en la cima del Pico de Tancítaro, debido a la presencia de bosques ubicados a altitudes mayores a 2500 msnm, en cambio, la menor producción de agua está en el piedemonte, ya que la cobertura de aguacate se extiende por toda esta zona (Fuentes, 2011).

Los escurrimientos en las cuencas Tancítaro y La Culebra de las clases muy bajos y bajos, menores a 708.9 mm/m^2 , se corresponden con las áreas de bosque, especialmente los ubicados en las partes altas. Los bosques de pino hartwegii y de abeto en la parte alta de las cuencas no tienen grandes cambios, por lo que permanecen con escurrimientos potenciales bajos y una infiltración potencial muy alta en las tres fechas trabajadas. Siendo esta una parte importante para la captación de lluvia, el hecho de que permanezca prácticamente intacta hace que las cuencas puedan seguir teniendo una buena capacidad de infiltración y almacenamiento de agua a lo largo del tiempo.

En las cuencas Tancítaro y La Culebra, la cantidad de escurrimiento potencial va disminuyendo, aunque cada clase se comporta de manera distinta. En los años 1974 y 2000 los escurrimientos de clase baja permanecen iguales, pero para el 2014 los escurrimientos de clase baja ocupan menos lo que coincide con la disminución de los bosques de pino-encino. Los escurrimientos de clase alta, mayores a 833.6 mm/m^2 , suelen estar en las áreas de cultivo de temporal, por lo tanto, al disminuir está cubierta en el 2000 y 2014, disminuye el área que ocupan de escurrimientos altos.

De la misma manera, la infiltración en los cultivos de temporal es de clase baja, debido a que está cubierta no ofrece una protección arbórea que proteja al suelo del agua que se precipita. Los cultivos permanentes, logran retener más infiltración que los cultivos de temporal, pero menos que los bosques, aunque en los bosques y en los cultivos permanentes la infiltración es muy parecida, al no variar tanto como en otro tipo de cubiertas.

Los cambios en el escurrimiento y la infiltración se corresponden con los cambios en las cubiertas, de tal manera que donde hay deforestación y degradación aumenta

la escorrentía, en cambio donde hay recuperación y cambio de cultivos de temporal a permanentes disminuye la escorrentía, excepto donde la recuperación se da con el cambio de pasto a matorral, pues aumenta la escorrentía ya que el número de curva de los pastizales es menor que la vegetación secundaria. Hubo una fuerte correlación entre las cubiertas y el escurrimiento y la infiltración, para los diferentes años fue de 0.8 en el escurrimiento en ambas cuencas.

En la cuenca Tancítaro la infiltración de clase muy baja se localiza en las localidades grandes, que son Tancítaro y Pareo. Hay también una zona en la parte baja de la cuenca con infiltración de clase baja, que se explica por el suelo que es menos permeable, ya que las cubiertas corresponden a bosque de pino-encino y cultivos permanentes.

En la cuenca La Culebra la infiltración de clase muy alta abarca casi la mitad de la cuenca y se mantiene estable en los diferentes años. Por otro lado, hay una zona pequeña con infiltración de clase muy baja que se explica por el suelo impermeable que existe ahí, ya que las cubiertas que se encuentran son bosque de pino-encino y cultivos permanentes.

En 1974 hay más bosque de pino-encino, por lo tanto, menor escurrimiento y mayor infiltración, en la cuenca La Culebra que en la cuenca Tancítaro. Además, la cuenca Tancítaro tiene más área de escurrimientos altos debido a la gran cantidad de cultivos de temporal que existían en este año.

Para el año 2000, el porcentaje de bosques es más parecido entre las dos cuencas, por lo que el porcentaje de los escurrimientos bajos tampoco difiere mucho. En ambas cuencas la clase de escurrimientos medios crece con el aumento de los cultivos permanentes, a la vez que la infiltración de clase alta aumenta casi al doble.

En 2014 el porcentaje de bosques se iguala a 54% en las cuencas y el porcentaje de escurrimientos bajos casi es el mismo. Sin embargo, en la cuenca Tancítaro también aumentan los cultivos permanentes y por lo tanto hay más escurrimientos de clase media que de clase baja, en este tenor aumenta la infiltración de clase media, por el mismo crecimiento de las huertas de aguacate. En cambio, en la cuenca La culebra aumenta la infiltración de clase alta al haber más recuperación de la vegetación, por medio del crecimiento de matorrales y las plantaciones.

Entre 1974 y 2000 la deforestación es mayor en la cuenca La Culebra, además de que su efecto es más visible, teniendo como consecuencia que el aumento del escurrimiento sea mayor en esta cuenca, pues baja el porcentaje de escurrimientos bajos. En la cuenca Tancítaro el efecto del cambio de cultivos de temporal a cultivos permanentes es más grande, así que la disminuyen el porcentaje de escurrimientos altos y aumenta el porcentaje de escurrimientos medios.

Del 2000 al 2014 en la cuenca Tancítaro hay más deforestación y las áreas que se convierten en cultivos permanentes siguen aumentando, así que el escurrimiento

aumenta más en esta cuenca, ya que disminuye el porcentaje de escurrimientos bajos y aumenta el porcentaje de escurrimientos medios. En la cuenca La Culebra, el escurrimiento disminuye, pues los el porcentaje de escurrimientos bajos es mayor que el porcentaje de escurrimientos medios.

De 1974 a 2014 la deforestación es casi igual en ambas cuencas y el aumento en el escurrimiento no difiere mucho. Pero en la cuenca Tancítaro el cambio a cultivos permanentes es más grande, por lo que en esta cuenca disminuye más el escurrimiento y aumenta más la infiltración que en la cuenca La Culebra.

Usar los sistemas de información geográfica para estimar los componentes del balance hídrico en cuencas no aforadas, permiten entender el efecto del cambio de uso de suelo sobre la hidrología, al poder estimar las condiciones hidrológicas en los distintos periodos en los que se presenta el cambio de cubiertas y uso de suelo (Mendoza, *et al*, 2002).

El aumento en la infiltración sobre los cultivos de aguacate puede traer como consecuencia que el agua esté contaminada. Los pesticidas y fertilizantes químicos se acumulan en el suelo, debido a que se aplican frecuentemente en los cultivos, y ya que algunos de estos fertilizantes no se degradan, con la precipitación y el riego son transportados hacia diferentes fuentes de agua (Bravo, *et al*, 2009).

Conclusiones

El cambio más importante ocurrido en las cuencas Tancítaro y La Culebra fue la conversión de cultivos de temporal a cultivos permanentes, lo cual quiere decir que el cultivo de maíz fue abandonado al mismo tiempo que surgió el cultivo de aguacate. Esto sucedió debido a que la zona tiene las condiciones ideales para que crezca el árbol de aguacate además de que existe una demanda creciente de aguacate en el mercado internacional, ocasionando que el cultivo de esta fruta sea más rentable que otros tipos de cultivos, como el maíz.

A diferencia de otras partes en la franja aguacatera, la deforestación en las cuencas Tancítaro y La Culebra durante el periodo de 1974 a 2014 fue baja. El principal motivo de la baja tasa de deforestación en estas cuencas es que la zona tiene una larga historia agrícola, lo que quiere decir que ya había campos de cultivo antes de que llegara el aguacate, por lo que gran parte de las zonas aprovechables para la agricultura ya habían sido deforestadas antes de la entrada del aguacate.

Las distintas cubiertas tienen un gran efecto sobre la hidrología de las cuencas Tancítaro y La Culebra, pues los cambios en el escurrimiento y en la infiltración potenciales dependen de los cambios que se dan en las cubiertas. El método de número de curva permitió visualizar la relación que tiene la vegetación y las diferentes cubiertas en la generación del escurrimiento y la infiltración. Al comparar los resultados de números de curva, escurrimiento e infiltración potenciales en las tres fechas, se observa con claridad como los cambios de cubiertas en las cuencas están relacionados con los cambios en el escurrimiento y la infiltración. De esta manera tenemos que, al poner los cultivos de aguacate, en zonas sin una cubierta permanente se va disminuyendo el escurrimiento potencial.

Es previsible que la capacidad de almacenamiento se matenga o aumente en estas dos cuencas al aumentar la infiltración, ya que esta permite la recarga del agua subterránea y, por tanto, de los manantiales que surten de agua a las diversas poblaciones que residen en el pico de Tancítaro. Sin embargo, no se conoce que haya habido un aumento en el volumen de los manantiales, pero tampoco se sabe que hayan disminuido claramente.

Por otro lado, en la parte alta de las cuencas, la calidad del agua que es almacenada se puede considerar como buena debido a que es retenida por los bosques de oyamel y pino hartwegii, que se encuentran en esta parte. En cambio, en las partes media y baja de las cuencas, aunque la infiltración aumenta lo hace sobre los cultivos de aguacate, lo que puede tener repercusiones en la calidad del agua que se almacena en estas zonas, pues los cultivos de aguacate tienden a utilizar distintos agroquímicos, los cuales pueden llegar al agua.

Puesto que es una zona muy importante dentro del estado de Michoacán, tanto ecológicamente al ser un área de protección de flora y fauna, como económica y culturalmente al encontrarse dentro de la zona aguacatera de Michoacán, para la industria aguacatera resulta fundamental que el pico de Tancítaro pueda ofrecer una gran cantidad de agua durante todo el año.

Las cuencas Tancítaro y La Culebra nos pueden dar una idea clara de lo que sucede en todo el pico al ser dos cuencas de gran importancia y representativas de la región. Por ejemplo, en la cuenca Tancítaro se encuentra una de las ciudades más grandes de la zona y la cuenca La Culebra se da la circunstancia de que es la cuenca más grande de la zona y, por tanto, ofrece una importante cantidad de agua como servicio ambiental.

Tener una estimación cercana a la realidad de los fenómenos hidrológicos de estas cuencas, como el escurrimiento y la infiltración, nos permite contar con una herramienta para tomar mejores decisiones con respecto a la distribución y el uso del agua (manejo integrado del agua), no sólo en estas dos cuencas, sino en todo el macizo montañoso del Pico de Tancítaro e incluso de otras regiones con las mismas características ambientales, sociales y económicas.

Bibliografía

- Ajmal, M., Waseem, M., Ahn, J. H. y Kim, T. W. (2016) Runoff estimation using the NRCS slope-adjusted curve number in mountainous watersheds. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142 (4).
- Arriaga, L., J.M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (2000). Regiones terrestres prioritarias de México. *Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad*, México.
- Barsimantov, J., y Antezana, J. N. (2008) Land use and land tenure change in Mexico's avocado production region: Can community forestry reduce incentives to deforest for high value crops. Artículo presentado en doceava conferencia biennial de la asociación internacional para el estudio de los comunes, Cheltenham, United Kingdom.
- Bocco, G., Mendoza, M., y Masera, O. R. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas*, 44, 18-38.
- Blöschl, G., Ardoin-Bardin, S., Bonell, M., Dorninger, M., Goodrich, D., Gutknecht, D., Matamoros, D., Merz, B., Shand, P. y Szolgay, J. (2007). At what scales do climate variability and land cover change impact on flooding and low flows? *Hydrological processes*, 21: 1241–1247.
- Bravo Espinoza, M., Sánchez Pérez, J. L., Vidales Fernández, J. A., Sáenz Reyes, J. T., Chávez León, J. G., Madrigal Huendo, S., Muñoz Flores, H. J., Tapia Vargas, L. M., Orozco Gutiérrez, G., Alcántar Rocillo, J. J., Vidales Fernández, I. y Venegas González, E. (2009) Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán. México: *Instituto nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias*.
- Bravo-Espinosa, M.E. Mendoza, T. Carlón Allende, L. Medina, J.T. Sáenz Y R. Páez. (2012). Effects of converting forest to avocado orchards on loss ground cover and topsoil properties in the Trans-Mexican Volcanic System, Mexico. *Land Degradation & Development*, 25 (5), 452-467.
- Bray, D. B., Ellis, E. A., Armijo-Canto, N., y Beck, C. T. (2004). The institutional drivers of sustainable landscapes: a case study of the 'Mayan Zone' in Quintana Roo, Mexico. *Land Use Policy*, 21(4), 333-346.
- Brondizio, E. S., y Moran, E. F. (2012) Level-dependent deforestation trajectories in the Brazilian Amazon from 1970 to 2001. *Population environmental*, 34, 69-85

- Calder, I. R. (1998) *Water-resource and land-use issues*. SWIM Paper 3. International Water Management Institute: Colombo, Sri Lanka.
- Castro, J. E., Kloster, K., y Torregrosa, M. L. (2005) Ciudadanía y gobernabilidad en México: el caso de la conflictividad y la participación social en torno a la gestión del agua. En Jiménez Cisneros, B. y Marín, L. *El agua en México vista desde la academia*. Tlalpan, Ciudad de México: Academia mexicana de ciencias.
- Challenger, A. (2003) Conceptos generales acerca de los ecosistemas templados de montaña de México y su estado de conservación. En Sánchez, O., Vega, E., Peters, E. y Monroy-Vilchis, O. *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*. INE-SEMARNAT: Ciudad de México, México.
- Chhabra, A., Geist, H., Houghton, R. A., Haberl, H., Braimoh, A. K., Vlek, P. L. G., Patz, J., Xu, J., Ramankutty, N., Coomes, O., y Lambin, E. F. (2006) Multiple Impacts of Land-Use/Cover Change. En Lambin, E. F. y Geist, H. *Land-use and land-cover change*. Berlín, Alemania: Springer.
- CONAGUA (2014). Estadísticas del Agua en México. Ciudad de México, México.
- Comisión nacional de áreas naturales protegidas (2014). Programa de manejo de área de protección de flora y fauna Pico de Tancítaro. Recuperado de: http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/2014/Pico_de_Tancitaro.pdf
- Cuevas García, G., y Priego Santander, A. (2005). Pronostico del cambio de uso del suelo en áreas forestales del estado de Michoacán (Tesis de licenciatura). Universidad nacional autónoma de México, México.
- De Fries, R. S. y Eshleman, K. N. (2004), Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future. *Hydrological processes*, 18: 2183–2186.
- De Fries, R. S., Foley, J. A., y Asner, G. P. (2004) Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function. *Frontiers in ecology and the Environment*, 2 (5), 249–257.
- De la Tejera, B., Santos, A., Santamaría, H., Gómez, T., y Olivares, C. (2013) El oro verde en Michoacán: ¿un crecimiento sin fronteras? Acercamiento a la problemática y retos del sector aguacatero para el Estado y la sociedad. *Economía y sociedad*, 17 (29), 15-40.
- Domínguez Mora, R., Esquivel Garduño, G., Méndez Antonio, B., Mendoza Reséndiz, A., Arganis Juárez, M. L. y Carrizosa Elizondo, E. (2008) *Manual del modelo para pronostico del escurrimiento*. Universidad nacional autónoma de México: México

- Dourojeanni, A. (1994) La gestión del agua y las cuencas en America Latina. *Revista de la CEPAL*, 53, 7-12.
- Dunne, T., Zhang, W., y Aubry, B. F. (1991) Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff. *Water resources research*, 27 (9), 2271-2285.
- Dupuy Rada, J. M., González Iturbe, J. A., Iriarte Vivar, S., Calvo Irabién, L. M., Espadas Manrique, C., Tun Azul, F., y Dorantes Euán, A. (2007). Cambios de cobertura y uso del suelo (1979-2000) en dos comunidades rurales en el noroeste de Quintana Roo. *Investigaciones geográficas*. 62, 104-124.
- FAO (1996). Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes. En línea <http://www.fao.org/docrep/007/w0015e/w0015e00.HTM>
- Fuentes Junco, J. J. A. (2003). *Papel de los recursos hídricos en un área natural protegida*. México: INE-SEMARNAT.
- Fuentes Junco, J. J. A. (2004) *Análisis morfométrico de cuencas: caso de estudio del parque nacional Pico de Tancítaro*. México: INE-SEMARNAT
- Fuentes Junco, J. J. A. y Bocco Verdinelli, G. (2003) El relieve como modelador y regulador de procesos en el paisaje. En Velázquez, A., Torres, A., y Bocco, G. *Las enseñanzas de San Juan*. México: INE-SEMARNAT
- Fuentes Junco, J. J. A. y Bocco Verdinelli, G. (2011). Estimación del recurso hídrico superficial en el pico de Tancitaro, Michoacán: oferta, demanda y escenarios de disponibilidad (Tesis de doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Gallart, F. y Llorens, P. (2003) Catchment Management under Environmental Change: Impact of Land Cover Change on Water Resources. *Water International*, 28 (3), 334-340
- García Ruíz, I. (2001) *Flora del Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán*. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Michoacán. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. H304. México, D.F.
- Garibay, C., y Bocco, G. (2007) *Situación Actual en el Uso del Suelo en Comunidades Indígenas de la Región P'urhépecha (1976-2005)*. CIGA-INE. México.
- Geist, H., McConnell, W., Lambin, E. F., Moran, E., Alves, D., Rudel, T (2006) Causes and Trajectories of Land-Use/Cover Change. En Lambin, E. F. y Geist, H. *Land-use and land-cover change*. Berlín, Alemania: Springer.

- Geist, H. J., y Lambin, E. F. (2002) Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *Bioscience*, 52 (2) 143-150.
- Gonzaga Giraldo, L. (2002) *Memorias: hidrología forestal (Influencia de los bosques)*. Medellín, Colombia: Universidad nacional de Colombia, Departamento de ciencias forestales.
- Guerra Peña, F. (2003) Las doce principales reglas de la interpretación fotogeológica y las bases fundamentales de que se derivan. Investigaciones Geográficas. *Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM. 50, 42-66.
- Gupta, R. S. (2008) *Hydrology and Hydraulic Systems*. Illinois, USA: Waveland Press.
- Gutierrez Palacios, J. E (2005) *Topografía para las tropas*. Instituto geografico militar.
- Hibbert, A. R. (1967) *Forest treatment effects on water yield*. Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology. Pergamon Press: New York, 527-543
- Ibarra-Montoya, J. L., Román, R., Gutiérrez, K., Gaxiola, J., Arias, V., y Bautista, M. (2011) Cambio en la cobertura y uso de suelo en el norte de Jalisco, México: Un análisis del futuro, en un contexto de cambio climático. *Revista Ambiente E Agua*, 6(2), 111-128.
- IGM-CCCG (s.a) Interpretación Visual y Digital de Imágenes Satelitales. En línea: <http://files.especializacion-tig.webnode.com/200000348-2f5b33150d/Cap%201%20-%20IGM%20-%20Fund%20de%20la%20Interp%20Visual%20y%20Digital%20de%20Imag%20Sat.pdf>
- Infoagro (s.a) El cultivo del aguacate. En línea: http://www.infoagro.com/frutas/frutas_tropicales/aguacate.htm
- Irwin, E. G. y Geoghegan, J. (2001) Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change. *Agriculture, ecosystems and environment*, 85, 7-23.
- Jackson, R. B., Carpenter, S. R., Dham, C. N., McKnight, D. M., Naiman, R. J., Postel, S. L., y Running, S. W. (2001) Water in a changing world. *Ecological Applications*, 11 (4), 1027–1045.
- Johnson, N., Revenga, C., y Echeverria, J. (2001). Managing water for people and nature. *Science*, 292, 1071-1072.
- Kelly, J. H. (2012) La posesión de tierra y producción de agua. *Reflexiones*, 91 (1), 289-298.

- Kelly, S. y Hilton, J. (2015) Land use and water supply. En *The Utton Transboundary Resources Center. Water matters*. Nuevo México, USA: Universidad de Nuevo México.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P. S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E. F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P. S., Richards, J. F., Skanes, H., Steffen, W., Stone, G. D., Svedin, U., Veldkamp, T. A., Vogel, C., y Xu, J. (2001) The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global environmental change*, 11, 261-269.
- Lambin, E. F. y Geist, H. (2006). Land-use and land-cover change. Berlín, Alemania: Springer.
- Lavao Pastrana, S. A. y Corredor Rivera, J. L. (2014) Aplicación de la teoría del número de curva (CN) a una cuenca de montaña. caso de estudio: cuenca del río murca, mediante la utilización de sistemas de información geográfica (Tesis de licenciatura) Universidad militar nueva granada, Bogotá.
- Loaiza, J. C. y Valentijn, R. N. (2011) Desarrollo de modelos hidrológicos y modelación de procesos superficiales. Caso de estudio para vertientes de alta montaña. *Revista gestión y ambiente*, 14 (3), 23-32.
- López Alonso, R. (2001) Consideraciones acerca de los límites de aplicación del método de número de curva del soil conservation service. *Montes*, 66, 92-97.
- López García, M. J., Camarasa Belmonte, A. M., Mateu Bellés, J. F (2007) Cambios en los usos del suelo y producción de escorrentía en ramblas mediterráneas: carraixet y poyo (1956-1998). *Boletín de la asociación de geógrafos españoles*, 44, 69-94
- Maldonado Muñoz, Z. (2006) Manejo de recursos comunes en el contexto isleño: un modelo innovador en el Caribe. *Medio ambiente y comportamiento humano*, 7(2), 73-93
- Manson, R. H. (2004) Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y bosques*, 10 (1), 3-20.
- Mas, J. F., Velázquez, A., y Couturier, S. (2009) La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental*, 1 (1), 23-30.
- Mendoza, M., Bocco, G., y Bravo, M. (2002) Spatial prediction in hydrology: status and implications in the estimation of hydrological processes for applied research. *Progress in physical geography*, 26 (3), 319-338.

- Mendoza, M., Bocco, G., López Granados, E., y Bravo, M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones geográficas*, (49), 92-117
- Messerli, B., Droz, M., Germann, P., Viviroli, D., Weingartner R., y Wunderle, S. (2003) Las montañas torres de agua del mundo. *Ciencia*, 72, 4-13
- Meunier, M. (1996) La cubierta forestal y las crecidas en las pequeñas cuencas de montaña. *Unasylva*, 47 (185).
- Montesillo-Cedillo, J. (2017). Suministro de agua potable en México: más allá del crecimiento poblacional. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8 (1), 21-33.
- Morales-Manila, L. M., y G. Cuevas-García. (2011). Inventarios 1974-2007, y evaluación del impacto ambiental regional del cultivo de aguacate en el estado de Michoacán. Morelia, Michoacán: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. 138.
- Neris, J., Fuentes, J., Dorta, M. A., Jiménez, C., y Tejedor, M. (2009) Influencia del cambio de uso en la tasa de infiltración de Andisoles (Tenerife, I. Canarias). En Congreso Internacional sobre Desertificación, en Murcia, España.
- Oki, T., y Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313, 1068-1072.
- Oswald Spring, U. (2011). *Water resources in Mexico*. Berlín, Alemania: Springer.
- Pérez Espejo, R. H., y Aguilar Ibarra, A. (2012) *Agricultura y contaminación del agua*. Ciudad de México, México: UNAM.
- PHI (2016) El ciclo del agua. UNESCO. En línea: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>
- Platt, R. H (2014). *Land use and society: geography, law and public policy*. Washington, Estados Unidos de América: Island Press.
- Ponce, V. M. y Hawkins R. H. (1996). Runoff curve number: has it reached maturity. *Journal of hydrologic engineering*, 1 (1), 11-19.
- Ramírez Sánchez, L., G. y Morales Manilla, L., M. (2009). Evaluación de tierras para el cultivo del aguacate de acuerdo con el conocimiento local del paisaje en la región del Pico de Tancítaro, Michoacán (Tesis de maestría). Universidad nacional autónoma de México, México.
- Ravnborg, H. M. & del Pilar Guerrero, M. (1999). Collective action in watershed management – experiences from the Andean hillsides. *Agriculture and human values*, 16, 257-266.

- Rosete Verges, F. y Bocco, G. (2008). Modelos predictivos de cambio de uso de suelo (Tesis de doctorado) Universidad nacional autónoma de México, México.
- SAGARPA (2011) Monografía de cultivos. Aguacate.
- Salazar-García, S., Zamora-Cuevas, L. y Vega-López, R. J. (2005) Actualización sobre la industria del aguacate en Michoacán, México. *California Avocado Society 2004-05 Yearbook* 87: 45-54.
- SEMARNAT (2012) Vegetación y uso del suelo. En línea: http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/02_vegetacion/cap2.html
- Schilling, K. E., Jha, M. K., Zhang, Y. K., Gassman, P. W. y Wolter, C. F. (2008) Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agricultural watershed: Historical effects and future directions, *Water resources research*, 44, 1-12.
- Sokolov, A. A. y Chapman, T. G. (1981) *Métodos de cálculo de balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos*. París. Francia: UNESCO
- Sophocleus, M. (2004). Global and regional water availability and demand: prospects for the future. *Natural Resources Research* (13) 2, 61-75.
- Stonestrom, D. A., Scanlon, B. R. y Zhang, L. (2009) Introduction to special section on impacts of land use change on water resources. *Water resources research*, (45) 7.
- Thomas, D. S. G. and Goudie, A. (2003) *The dictionary of physical geography*. Estados Unidos de América: Blackwell publishing.
- Toledo, A. (2002) El agua en México y el mundo. *Gaceta ecológica*, 64, 9-18.
- Toledo, A. (2006) *Agua, hombre y paisaje*. Ciudad de México, México: SEMARNAT
- Torregrosa, M. L., Domínguez Mora, R., Jiménez Cisneros, B., Kauffer Michel, E., Martínez Austria, P., Montesillo Cedillo, J. L., Palerm Viqueira, J., Román Calleros, A., Ruelas Morjardin, L. C. y Zapata Martelo, E. (2012) Los recursos hídricos en México. Situación y perspectivas. En Jiménez Cisneros, B. y Galizia Tundisi, J. (2012) *Diagnóstico del agua en las Américas*. Distrito Federal, México: Red interamericana de academias de ciencias. Foro consultivo científico y tecnológico, AC.
- Torres Cosío, R. (1967) *Fotointerpretación, su aplicación en la determinación de la clasificación y cartografía de los suelos de un área de la península de Nicoya, Guanacaste, Costa Rica*. Turrialba, Costa Rica: Instituto interamericano de ciencias agrícolas de la OEA.

- Velázquez, A., Bocco, G., y Siebe, C. (2014) Cambio de uso de suelo. En línea: https://www.researchgate.net/profile/Alejandro_Velazquez/publication/263342417_Cambio_de_uso_del_suelo/links/54e371780cf2b2314f5d22f4.pdf
- Velázquez Montes, J. A. y J. Fuentes Junco. 2004. *Biodiversidad, hábitat y manejo en el Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán, México*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. R092. México D. F.
- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., y Weingartner, R. (2007) Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water resources research*, 43 (7).
- WWAP (World water assessment programme). (2003) *Agua para todos, agua para la vida*. París, Francia: UNESCO.
- WWAP (World water assessment programme). (2006) *El agua, una responsabilidad compartida*. París, Francia: UNESCO.
- WWAP (World water assessment programme). (2009) *Water in a changing world*. París, Francia: UNESCO.
- Zapata-Sierra, A. y Manzano-Agugliaro, F. (2008) Influencia de seis especies arbóreas en la infiltración de agua en el suelo. *Agrociencia*, 42, 835-845.