



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

Facultad de Filosofía y Letras
División de Estudios de Posgrado
Posgrado en Geografía

**ESTIMACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO SUPERFICIAL
EN EL PICO DE TANCITARO, MICHOACÁN:
Oferta, Demanda y Escenarios de Disponibilidad.**

T E S I S

Que para obtener el Grado Académico de:

DOCTOR EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A :

JOSÉ DE JESÚS ALFONSO FUENTES JUNCO

DIRECTOR DE TESIS

DR. GERARDO BOCCO VERDINELLI



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.

Fuentes Junco J., 2011. Estimación del Recurso Hídrico Superficial en el Pico de Tancitaro, Michoacán: Oferta, Demanda y Escenarios de Disponibilidad. Facultad de Filosofía y Letras, División de Estudios de Posgrado, Posgrado en Geografía, UNAM, Morelia, Mich. 144 p.

PREFACIO

Este escrito se compone de 11 apartados incluyendo el índice; dos resúmenes, uno en español y otro en inglés; la introducción; seis capítulos; la bibliografía y los anexos.

La introducción toca el tema del agua superficial, su importancia en el mundo así como para México y el impacto del cambio climático en la oferta y demanda del recurso hídrico. Se incluye en este apartado la justificación y los objetivos de la tesis.

El Capítulo 1 trata toda la descripción y análisis del medio físico y social del Tancítaro y termina con un breve análisis del funcionamiento socio-ambiental tocando la relación del hombre que ahí habita con su entorno. El Capítulo 2 presenta una descripción detallada de los métodos y materiales empleados en el desarrollo del trabajo: desde la obtención de la morfometría de cuencas, pasando por el cálculo del balance hídrico y la generación de los tres escenarios de disponibilidad de agua en el Pico de Tancítaro. El Capítulo 3 desarrolla los aspectos relativos a la oferta de agua superficial. Aquí se muestran y analizan los datos que tienen que ver con la producción de agua superficial en el Tancítaro aunque también se hace referencia a la producción de agua subterránea en el Pico de Tancítaro. El Capítulo 4 da continuidad al escrito mostrando el análisis de la demanda de agua. Es necesario decir que en este proyecto solo se hace mención a una parte de dicha demanda: la generada por la población de la zona de estudio y la que demandan los cultivos de aguacate, a la postre, prácticamente el único cultivo de riego en la región. El Capítulo 5 toca el tema de los escenarios de disponibilidad tomando para el modelo, algunas premisas como la cobertura, la población y un modelo simple de expansión del aguacate y el maíz –los principales cultivos-. Es en realidad un capítulo de análisis y discusión de resultados. El Capítulo 6 aborda las conclusiones de este proyecto doctoral y hace referencia al hecho de que la oferta de agua superficial es mayor a la demanda y se elaboran algunas conclusiones a partir de este hecho.

Finalmente, la tesis presenta la bibliografía y los anexos. Cabe decir, que dentro del texto se han puesto los anexos más importantes, pero se ha agregado a este texto un CD con información relevante generada en paralelo con este estudio o bien por otros autores pero que constituye un acervo importante para el conocimiento de la sociedad michoacana y del país en general de una de las zonas naturales más importantes del occidente de nuestro territorio.

Para terminar, es conveniente señalar que gran parte de los datos aquí generados junto con los obtenidos por el autor en la realización de dos tesis de maestría y la participación en varios proyectos con otros colegas del Ex Departamento de Ecología y Recursos Naturales (hoy Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la UNAM en el Campus Morelia) y que datan del año 1998, permitieron el desarrollo de procesos como el cambio de categoría del Parque Nacional Pico de Tancítaro (hoy Área de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancítaro) entre 1999 y 2006; la generación del Programa Operativo de la Montaña Prioritaria Pico de Tancítaro (elaborado para CONAFOR) en 2008; así como el desarrollo de las primeras fases del ordenamiento ecológico del municipio de Tancítaro (Caracterización y Diagnóstico) en el 2010, y la colaboración directa en la generación del que será el Plan de Manejo de la ANP del Tancítaro para este 2011.

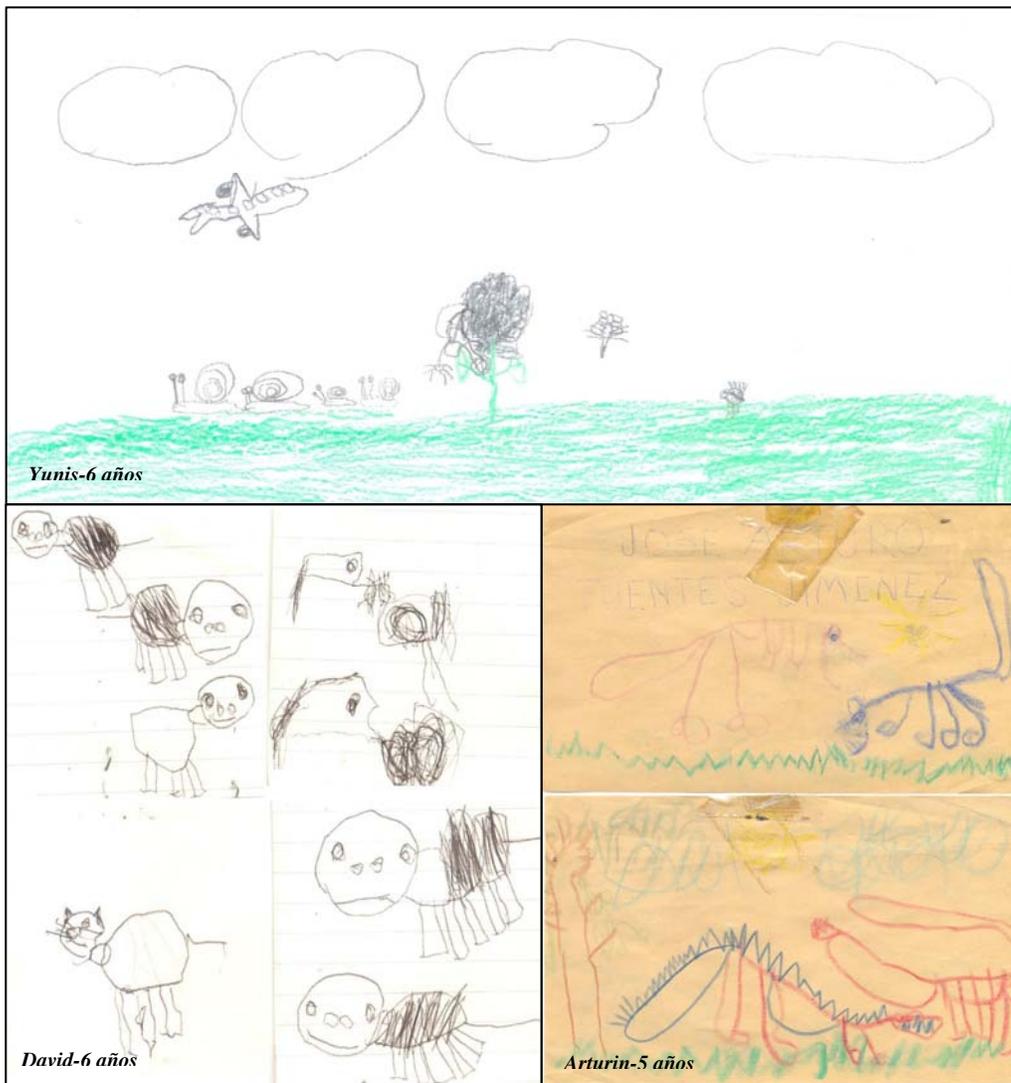
DEDICATORIA

A mi Madre (Chabelita, Q.E.P.D.) con un agradecimiento profundo por el amor, la vida y ejemplos que me dió para siempre seguir adelante.

A mi Padre (El "Bigos") porque al pasar de los años mi admiración y respeto por él crecen con profundo afecto.

A mi esposa Teresita por su increíble amor y compañía para tolerarme y alentarme a terminar mis metas.

A mis hijos Arturo, David y Yunuen con amor y alegría para que ellos también cumplan sus metas por grandes o chicas que sean. Gracias por sus dibujos!



El Paisaje tiene uno de sus mejores retratos en la imaginación de un niño.” Anónimo.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a mi asesor y amigo, el Dr. Gerardo Bocco –el argentino más mexicano que conozco-. Gerardo, te agradezco no solo por tu guía en el presente estudio, sino también por la confianza y en especial la paciencia dedicada. Solo deseo que la espera haya valido la pena para ti. Gracias mil!

Agradezco enormemente, la ayuda desinteresada y siempre atinada del Dr. Manuel Mendoza, sinodal de tesis. Estimado Manuel, tu asesoría y correcciones han sido muy relevantes y llenas de compañerismo para mejorar el escrito sustancialmente, muchas gracias.

Al Dr. Miguel Bravo por su asesoría permanente en la parte hidrológica. Estimado Miguel, tu ayuda y acuciosa revisión al texto así como el tiempo dedicado a mejorar mi trabajo tanto en campo como en gabinete es inestimable y memorable. Gracias.

Quiero agradecer especialmente al Dr. Alejandro Toledo, también miembro del sínodo, no solo por sus consejos y aportaciones sino también por su amistad. Estimado Dr. Igual que a Miguel, le agradezco infinitamente, su ayuda en campo y en gabinete y espero tener el honor nuevamente de estar en campo con Usted –y si es en las Islas Marias, mejor!-

Al Dr. Alejandro Velazquez, miembro del sínodo por su ayuda y permanente apoyo para poder terminar este trabajo. Gracias también a ti Alex.

A la Dra. Patricia Ávila por sus valiosos comentarios en la parte social y ambiental antes y durante el examen de candidatura. Gracias Paty.

A las Comunidades Indígenas de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Angahuan y Zacán; así como al Ejido de La Majada por su inestimable apoyo en campo. A las autoridades de las localidades de: San Francisco Peribán, Zacándaro, Peribán de Ramos y Tancitaro también por su ayuda para realizar las mediciones de volúmenes de manantiales y arroyos.

Mi agradecimiento póstumo a Don Fidel, cuidador del Centro Ecoturístico Pantzingo a quien agradezco infinitamente su ayuda en campo. Fue un placer lleno de aprendizajes. Q.E.P.D.

Agradezco sinceramente a Vicente Salinas Melgoza, por su ayuda y por compartir con nosotros su pseudo gastritis de cada salida –ja!-; por cierto, también por el método de la plastilina para medir caudales!; a Giovanni Ramírez Sánchez por su inestimable ayuda en campo, esperando que ese trabajo le haya dejado grandes aprendizajes.

Muy especialmente quiero agradecer a Francisco Sánchez Espinosa. Estimado Paco, espero con estas líneas poder expresar mi profundo agradecimiento por tu ayuda desinteresada (ya hasta parecía tu tesis mano!) tanto en campo como en gabinete y espero que como hasta ahora, sigamos en la brecha de aportar a esa gran región que es el Tancitaro, pero sobre todo, abonar a nuestra amistad. Muchas gracias por tu confianza y tu trabajo (y espero que algún día seas el “preciso de Peribán” ja!).

Agradezco sinceramente al Dr. Ken Oyama su apoyo irrestricto y desinteresado para concluir mi tesis y espero siempre corresponder a la altura de su amistad y apoyo. Gracias!

A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México en cuyos recintos me he preparado desde el CCH aprendiendo que una gran Universidad lo es por sus principios y su gente. También agradezco al Posgrado en Geografía el haberme acogido en la Maestría y Doctorado.

Al CONACYT por la beca otorgada durante cinco años.

Finalmente, a mis hermanos, familiares y amigos que desinteresadamente se preocuparon por mi tesis. Gracias a todos.



Foto del Recuerdo....

De izquierda a derecha: Dr. Alejandro Toledo; Mtro. Francisco Sanchez Espinosa; Dr. Miguel Bravo Espinosa y Mtro. Jesús Fuentes Junco. Salida de cuenca del Río Zacàndaro, 2002.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	5
ÍNDICE GENERAL	7
ÍNDICE DE CUADROS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
INTRODUCCIÓN	15
<i>Importancia del agua en el Mundo</i>	15
<i>El agua en el mundo, implicaciones de la oferta y la demanda</i>	17
<i>Impacto del cambio climático en la oferta y demanda de agua.</i>	19
<i>Perfil hidrológico de México, la oferta y demanda nacionales.</i>	23
<i>Disponibilidad de datos y enfoques de estudio</i>	27
Objetivos e hipótesis	31
<i>Objetivo general</i>	32
<i>Objetivos particulares</i>	32
CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL MEDIO FÍSICO Y SOCIAL.....	33
El entorno ambiental del Tancitaro	33
El medio físico	35
<i>Geología</i>	35
<i>Geomorfología</i>	38
El medio biótico.....	47
El entorno social del Tancitaro	49
<i>El funcionamiento socio-ambiental</i>	50
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	57
Morfometría de cuencas.....	57
<i>Índice de alargamiento o elongación (Ia)</i>	58
<i>Coefficiente de forma (Kf)</i>	58
<i>Coefficiente de compacidad (Kc)</i>	59
<i>Densidad de drenaje</i>	59
<i>Altura media</i>	60
<i>Coefficiente de masividad (Km)</i>	61
<i>Curva hipsométrica</i>	61
Balance hídrico	62

<i>Análisis hidro-meteorológico</i>	65
<i>Evapotranspiración potencial (ETP)</i>	66
<i>Escurrimiento y Precipitación Efectiva (Pef)</i>	66
<i>Retención de humedad en el suelo</i>	67
<i>Cálculo del almacenamiento real de humedad</i>	67
<i>Déficit de Agua Mensual</i>	68
<i>Excedente de agua Mensual</i>	68
Aforos de ríos y manantiales.....	69
Oferta de agua superficial.....	72
Demanda social de agua.....	72
Escenarios de disponibilidad de agua.....	73
<i>Escenario pesimista</i>	73
<i>Escenario optimista</i>	74
CAPÍTULO 3. OFERTA DE AGUA SUPERFICIAL.....	75
Características de la precipitación.....	75
Características de la Evapotranspiración.....	79
Características del escurrimiento.....	80
<i>Aportaciones anuales de manantiales y corrientes principales en las cuencas del Tancítaro.</i> .	81
Morfometría de cuencas.....	85
<i>Cuenca Apo</i>	86
<i>Cuenca Chondo</i>	87
<i>Cuenca Chuanito</i>	89
<i>Cuenca Rodada</i>	90
<i>Cuenca Cutío</i>	91
<i>Cuenca El Chivo</i>	93
<i>Cuenca Hoyicazuela</i>	94
<i>Cuenca Huandiestacato</i>	95
<i>Cuenca La Culebra</i>	97
<i>Cuenca La Gringa</i>	98
<i>Unidad hidrológica Lavas del Paricutín</i>	100
<i>Cuenca Nureto</i>	101
<i>Cuenca San Francisco</i>	102
<i>Cuenca Tancítaro</i>	104
<i>Cuenca Zacándaro</i>	106
<i>Cuenca Zirimóndiro</i>	107
Balance hídrico comparado.....	109

<i>Balance Hídrico Anual</i>	109
<i>Distribución espacial del déficit y del excedente de agua</i>	110
<i>Déficit y excedente de agua anual</i>	110
<i>Comparación del balance hídrico superficial estimado de los años 1996 y 2003</i>	111
CAPÍTULO 4. DEMANDA DE AGUA.....	118
Necesidades de agua según cultivos.....	118
Necesidades de agua según uso doméstico rural y urbano.....	119
CAPÍTULO 5. ESCENARIOS (ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS).....	124
Modelo de oferta y demanda actual.....	124
Modelo pesimista de demanda de agua.....	125
Modelo optimista de demanda de agua.....	128
Consideraciones respecto a la estimación del recurso hídrico bajo un esquema de manejo y conservación del parque nacional.....	132
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	135
La oferta y demanda de agua.....	135
BIBLIOGRAFÍA.....	137
ANEXOS.....	145
Importancia socio-ambiental del Tancitaro.....	145

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. CANTIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS EN EL MUNDO Y SU COMPARACIÓN CON LA POBLACIÓN MUNDIAL (FAO, 2003).	18
CUADRO 2. PROBLEMAS DEL AGUA EN MÉXICO Y EL MUNDO.	19
CUADRO 3. BALANCE HÍDRICO DE LA REPÚBLICA MEXICANA.	24
CUADRO 4. BALANCE HÍDRICO POR REGIONES.	25
CUADRO 5. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DEL TANCÍTARO.	34
CUADRO 6. GEOLOGÍA DEL DISTRITO VOLCÁNICO DE TANCÍTARO.	37
CUADRO 7. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS IDENTIFICADAS EN EL ÁREA DEL TANCÍTARO.	38
CUADRO 7. CONTINUACIÓN. UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS IDENTIFICADAS EN EL ÁREA DEL TANCÍTARO.	39
CUADRO 8. VALORES DE COMPACIDAD DE CUENCAS.	59
CUADRO 9. HOJA DE CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA MEDIANTE AFORO DE ARROYOS CON MOLINETE.	70
CUADRO 10. DATOS DE PRECIPITACIÓN DE LAS ESTACIONES CONSIDERADAS EN EL ESTUDIO.	76
CUADRO 11. VOLUMEN DE PRECIPITACIÓN ANUAL POR CUENCA EN METROS CÚBICOS.	78
CUADRO 12. PRECIPITACIÓN, EVAPOTRANSPIRACIÓN Y AGUA DISPONIBLE POR CUENCA EN EL PICO DE TANCÍTARO.	80
CUADRO 13. ESCURRIMIENTO ANUAL EN MM POR CUENCA.	81
CUADRO 14. VOLUMEN DE AGUA ESTIMADO EN MANANTIALES Y RÍOS.	82
CUADRO 15. VOLUMEN DE MANANTIALES POR CUENCA SEGÚN PERIODO DE LLUVIAS Y SECAS	84
CUADRO 16. GASTO EN LITROS POR SEGUNDO (LPS) DE CADA MANANTIAL Y SALIDA DE CUENCA.	85
CUADRO 17. CUENCAS HIDROGRÁFICAS DEL TANCÍTARO.	86
CUADRO 18. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA APO.	87
CUADRO 19. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA CHONDO.	88
CUADRO 20. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA CHUANITO.	90
CUADRO 21. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA RODADA.	91
CUADRO 22A. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA CUTÍO.	92
CUADRO 22B. CONTINUACIÓN. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA CUTÍO.	93
CUADRO 23. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA EL CHIVO.	94
CUADRO 24. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA HOYICAZUELA.	95
CUADRO 25. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA HUANDIESTACATO.	97
CUADRO 26. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA LA CULEBRA.	98
CUADRO 27. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA LA GRINGA.	99
CUADRO 28. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA UNIDAD HIDROLÓGICA LAVAS DEL PARICUTÍN.	101
CUADRO 29. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA NURETO.	102
CUADRO 30. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA SAN FRANCISCO.	103
CUADRO 31. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA TANCÍTARO.	105
CUADRO 32. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA ZACÁNDARO.	107
CUADRO 33. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LA CUENCA ZIRIMÓNDIRO.	109
CUADRO 34. CLASES DE EXCEDENTE Y DÉFICIT DE AGUA PARA RECLASIFICACIÓN DE LOS MAPAS DE VALORES RESPECTIVOS.	110
CUADRO 35. VALOR DEL VOLUMEN DE AGUA EN LOS ACUÍFEROS REGIONALES DE LA ZONA DE ESTUDIO Y APORTE DE VOLUMEN DE AGUA DEL TANCÍTARO SEGÚN SUPERFICIE OCUPADA POR LOS ACUÍFEROS.	116
CUADRO 36. COBERTURA VEGETAL DEL PICO DE TANCÍTARO PARA EL AÑO 20051	118
CUADRO 37. CONSUMO DE AGUA POR HABITANTE AL AÑO Y DIARIO, EN LOS AÑOS 1999 Y 2000 EN CUATRO CIUDADES DE LA REGIÓN DEL TANCÍTARO.	120
CUADRO 38. CONSUMO DOMÉSTICO DE AGUA PER CÁPITA DIARIO ESTIMADO SEGÚN CNA (1994).	120
CUADRO 39. CONSUMO DE AGUA ESTIMADO (DEMANDA) EN 2000 PARA DOS LOCALIDADES EN EL PICO DE TANCÍTARO, A PARTIR DEL RANGO TÉRMICO Y EL NIVEL DE SALARIO, DE ACUERDO CON CNA (1994).	121
CUADRO 40. DEMANDA TOTAL DOMÉSTICA DE AGUA, EN METROS CÚBICOS POR DÍA POR CUENCA Y TOTAL DEL TANCÍTARO POR DÍA, PARA LOS AÑOS 1990, 2000, 2005 Y 2010 EN EL TANCÍTARO.	122
CUADRO 41. DEMANDA DE AGUA EN EL PICO DE TANCÍTARO PARA USO DOMÉSTICO Y AGRÍCOLA EN EL 2010.	123
CUADRO 42. OFERTA Y DEMANDA DE AGUA ACTUAL PARA EL PICO DE TANCÍTARO.	125
CUADRO 43. TASAS DE CRECIMIENTO POBLACIONAL 200-2005.	129
CUADRO 44. COMPARATIVO DE ESCENARIOS DE VOLUMEN DE DEMANDA DE AGUA DOMÉSTICA POR CUENCAS PARA EL PICO DE TANCÍTARO, MICH.	131

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DISPONIBILIDAD DE AGUA DULCE EN EL MUNDO	17
FIGURA 2. TENDENCIA DE LAS LLUVIAS EN PERIODOS ESCOGIDOS PARA CUATRO ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS CERCANAS AL PICO DE TANCÍTARO.	21
FIGURA 3. GRÁFICAS QUE MUESTRAN TENDENCIA AL RETRASO DE LLUVIAS PARA EL MES DE MAYO, EN ESTACIONES SELECCIONADAS CERCANAS A TANCÍTARO. EL RETRASO SE MANIFIESTA POR EL REGISTRO EN 0 MM DE LLUVIA.	22
FIGURA 4. COMPARACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MENSUALES Y ANUALES (EN MM) PARA CUATRO ESTACIONES ESCOGIDAS DE LA REPÚBLICA MEXICANA.	24
FIG. 5. BALANCE HIDROLÓGICO DE MÉXICO.....	26
FIGURA 6 DISPONIBILIDAD NATURAL MEDIA DE AGUA EN MÉXICO (CNA, 2008)	27
FIGURA 7. MAPA DE LA REPÚBLICA MEXICANA MOSTRANDO LA LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES HIDROMÉTRICAS EN EL PAÍS.	28
FIGURA 8. ESTACIÓN HIDROMÉTRICA MÁS CERCANA AL PICO DE TANCÍTARO.	30
FIGURA 9. LOCALIZACIÓN DEL PICO DE TANCÍTARO EN EL CONTEXTO DE MUNICIPIOS, CUENCAS Y PARQUE NACIONAL EN EL ESTADO DE MICHOACÁN.	33
FIGURA 10. CLIMAS PRESENTES EN LA ZONA DE ESTUDIO	35
FIGURA 11. MAPA DE UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DEL PICO DE TANCÍTARO, MICHOACÁN.	40
FIGURA 12. ROCAS ANDESÍTICAS «LAJEADAS» POR INFLUENCIA PERIGLACIAR EN LA SUPERFICIE CUMBRAL DEL TANCÍTARO.	41
FIGURA 13. VALLE EN “V”. EL BOSQUE ABIERTO ES DE PINUS HARTWEGII CON PASTOS MONTANOS.	42
FIGURA 14. VALLE EN “U”. LAS LADERAS SON PRONUNCIADAS CON FRECUENTES ESCARPES Y FORMA TENDIENTE A LA CONCAVIDAD AFECTADAS POR PROCESOS PERIGLACIARES.	43
FIGURA 15. VISTA DE UNA LADERA EXTERNA DEL TANCÍTARO.	43
FIGURA 16. ESTRUCTURA VOLCÁNICA MONOGENÉTICA TÍPICA.	44
FIGURA 17. LADERAS DE DERRAMES LÁVICOS EN TORNO AL CERRO PRIETO.	45
FIGURA 18. PIEDEMONTE CON CULTIVOS ANUALES Y BOSQUE DE ABIES MUY PERTURBADO.	46
FIGURA 19. ESPECIES DE FLORA Y FAUNA DEL TANCÍTARO BAJO ALGUNA CATEGORÍA DE LA NORMA OFICIAL MEXICANA 059-ECOL-2001.	48
FIGURA 20. ESPECIES DE ANIMALES, NÚMERO DE ENDEMISMOS POR GRUPO Y PORCENTAJE DEL TOTAL.	49
FIGURA 21. MAPA DE SITIOS SOCIALES Y TENENCIA DE LA TIERRA EN EL PARQUE NACIONAL PICO DE TANCÍTARO.	51
FIGURA 23. ESQUEMA DE LA ORGANIZACIÓN SOCIAL PARA LA TOMA DE DECISIONES.	55
FIGURA 24. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS EN SIG.	57
FIGURA 25. PASOS PARA OBTENER DOS MAPAS SINTÉTICOS DEL BALANCE HÍDRICO ANUAL: EL DE EXCEDENTE Y EL DE DÉFICIT DE AGUA.	63
FIGURA 26. LOCALIZACIÓN DE CUENCAS Y MANANTIALES AFORADOS EN EL PICO DE TANCÍTARO.	71
FIGURA 27. PORCENTAJE DE PRECIPITACIÓN PARA CADA ESTACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN LAS TEMPORADAS DE SECAS Y LLUVIAS.	77
FIGURA 28. RELACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN CON LA ALTITUD PARA ESTACIONES CERCANAS AL PICO DE TANCÍTARO.	78
FIGURA 29. LOCALIZACIÓN DE MANANTIALES Y SALIDAS DE CUENCA PARA AFORAMIENTO.	83
FIGURA 30. VOLUMEN DE MANANTIALES POR CUENCA POR PERIODO DE LLUVIAS Y ANUAL	84
FIGURA 31. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE APO.	86
FIGURA 32. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE CHONDO.	88
FIGURA 33. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE CHUANITO.	89
FIGURA 34. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE CUENCA RODADA.	91
FIGURA 35. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE RÍO CUTIO.	92
FIGURA 36. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE RÍO CHIVO.	93
FIGURA 37. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE HOYICAZUELA.	95
FIGURA 38. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE HUANDIESTACATO.	96
FIGURA 39. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE LA CULEBRA.	98
FIGURA 40. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE LA GRINGA.	99
FIGURA 41. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE LAS LAVAS DEL PARICUTÍN.	100
FIGURA 42. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE NURETO.	101
FIGURA 43. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE SAN FRANCISCO.	103
FIGURA 44. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE TANCÍTARO.	104
FIGURA 45. CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE ZACÁNDARO.	106

FIGURA 46 CUENCA Y PERFIL LONGITUDINAL DE ZIRIMÓNDIRO.....	108
FIGURA 47. EXCEDENTE DE AGUA EN EL TANCÍTARO PARA LOS AÑOS 1996 Y 2003.....	112
FIGURA 48. COMPARACIÓN DE LA SUPERFICIE CON EXCEDENTES DE AGUA ENTRE 1996 Y 2003. VALORES EN PORCENTAJE DE SUPERFICIE.....	112
FIGURA 49. MAPAS DE DÉFICIT DE AGUA PARA EL AÑO 1996 Y 2003.	114
FIGURA 50. COMPARACIÓN DE LA SUPERFICIE CON DÉFICIT DE AGUA EN EL TANCÍTARO, PARA LOS AÑOS 1996 Y 2003. VALORES EN PORCENTAJE DE SUPERFICIE.....	115
FIGURA 51. ACUÍFEROS REGIONALES DEL ÁREA DE ESTUDIO.	117
FIGURA 52. MAPA POTENCIAL DE MAÍZ EN EL TANCÍTARO. EL MAÍZ SE APRECIA EN COLOR AMARILLO.....	126
FIGURA 53. MAPA POTENCIAL DE AGUACATE EN EL TANCÍTARO PARA EL AÑO 2026. EL AGUACATE SE APRECIA EN COLOR NARANJA.....	127
FIGURA 54. MAPA POTENCIAL DE AGUACATE Y MAÍZ EN EL TANCÍTARO PARA EL AÑO 2026.....	128
FIGURA 55. MAPA DE COBERTURA POTENCIAL DE BOSQUE CERRADO EN EL TANCÍTARO PARA EL AÑO 2026.....	130

RESUMEN

Resumen

Este trabajo se centra en el análisis geográfico de la oferta y demanda de agua superficial en el Pico de Tancítaro, localizado al oeste del Estado de Michoacán y el cual es un estratovolcán y la montaña más alta del Estado. En México, el monitoreo y evaluación del recurso hídrico a través de registros históricos es aún incipiente e insuficiente ya que los datos existentes se encuentran incompletos o son insuficientes dificultando de esta forma la planeación y el manejo de dicho recurso. Debido a lo anterior y aunado a una infraestructura de registro escasa o en malas condiciones, es que se ha recurrido desde siempre a la estimación del recurso agua mediante métodos indirectos que nos permitan conocer su volumen y los procesos inherentes a dicho recurso. Parte de los supuestos de este estudio es que es posible realizar diagnósticos y plantear escenarios sobre el potencial de los recursos en general y del agua en particular, mediante estimaciones que pueden ser controladas a través de metodologías múltiples que involucren un análisis multicriterio y multifactorial. Este estudio estimó el recurso hídrico a partir de un enfoque conceptual más práctico pero también en cuanto a la incorporación de herramientas múltiples de diagnóstico que abarcan el ámbito social inclusive, siendo éste un tema poco incorporado en este tipo de trabajos.

Objetivo general

Estimar la disponibilidad del agua superficial en el Pico de Tancítaro y formular escenarios de disponibilidad en función de la demanda social.

Métodos

Se midieron los volúmenes de arroyos en las salidas de las cuencas presentes en el Tancítaro utilizando un molinete de copas y mediante la técnica del flotador; asimismo, se midieron directamente los volúmenes de manantiales mediante recipientes preparados para ello. Las mediciones se realizaron en la estación de lluvias y en la de secas durante dos años y medio. El consumo de agua doméstico y para riego se estimó a partir de datos existentes. Con el objeto de comparar los volúmenes de agua superficial, se realizaron mapas morfométricos de cada cuenca y se modeló el balance de agua para el Tancítaro mediante herramientas de SIG. Finalmente, con todos estos insumos, se modelaron tres escenarios para la oferta y demanda de agua en el SIG: escenario actual, escenario pesimista y escenario optimista con un horizonte de 30 años.

Resultados

La oferta de agua del Tancítaro se estima en un volumen de agua cercano a los 43.1 millones de m³ por año, de los cuales aproximadamente 15.3 millones provienen de los manantiales y 27.7 de los ríos. También, de acuerdo con datos pre-existentes de la Comisión Nacional del Agua (CNA), la cantidad aportada por los acuíferos asciende a 48.5 millones de m³. El modelo de balance de agua superficial estima que el Tancítaro es deficitario de agua prácticamente todo el año a excepción de los meses lluviosos (Agosto-Septiembre).

Conclusiones

De acuerdo a los datos obtenidos, aparentemente la oferta de agua superficial en el Tancítaro, por ahora excede a la demanda, indicando de esta forma, que el problema de agua en Tancítaro tiene que ver más con la administración del agua que con una escasez dada por la cantidad de asentamientos humanos. Es decir, que el uso y manejo actual del recurso es deficiente, lo que conduce a prever en el mediano plazo una crisis de agua superficial que podría agravarse debido a la ausencia de políticas estatales y municipales para el uso sustentable del agua.

Finalmente, este trabajo confirma que el uso de datos existente combinados con datos tomados en campo permiten estimar la oferta y demanda de agua proveyendo de información significativa para el manejo adecuado de este recurso natural.

ABSTRACT

Summary

The thesis focused on the analysis of supply and demand of surface water in Tancítaro Peak, located in western Michoacan, Mexico. In Mexico, water monitoring and assessment using historical records is incipient and insufficient, existing data are incomplete or not available and difficult for management and environmental planning. The low and erratic data and infrastructure, have led to studies of water resource estimate using indirect methods to understand behavior and amount. This study estimated the water resources with a more practical conceptual approach incorporating multiple diagnostic tools that encompass the social environment, which is a subject rarely treated in such studies. The study contributes to water management by analyzing the lack of balance between supply and demand of water contributing to the scientific discussion of geographic analysis and suggests the possibility to set scenarios about the potential of water resources, with estimates that can be controlled with multiple methodologies involving multiple criteria and multivariate analysis with a view to management and water management.

General objective.

Estimate the availability of surface water in Tancítaro and formulate scenarios for the satisfaction of social water demand in time.

Methods

Measured outputs of basin, springs, water volume using cups pinwheel for the first and direct measurement with container for the rest. This work was performed during dry and rainy seasons for each river and spring for two years and a half. Domestic water and irrigation use pre-existing data were obtained. Morphometric maps in basins and surface water balance were developed in a GIS to compare with volumes of water supply. Finally, scenarios were modeled for supply and demand for water from GIS data processing.

Results

Surface water supply of the Tancítaro is estimated at 43,1 million cubic meters per year, of which 15.3 million relates to the production of springs and 27.7 to the rivers. Also, according to pre-existing data (Comisión Nacional del Agua or CNA), groundwater amounted to 48.5 million cubic meters. Modeling water balance indicates the territory of the Tancítaro deficit almost throughout the year except the rainiest months of August and September.

Conclusions

In Tancítaro, water supply exceeds demand. This indicates the problem of water scarcity lays in the planning of availability and use. Forms of consumption and current management of water sources indicate that the Tancítaro could have a water surface crisis in the mid future due to lack of water because current uses are inadequate and there is no State or municipal policy which satisfies the sustainable use of water. This work confirms that the use of existing data combined with data taken in field allows estimating the supply and demand of water and their proper analysis, providing significant information for the management of this natural resource.

INTRODUCCIÓN

Importancia del agua en el Mundo

El agua constituye hoy en día el recurso natural más importante y estratégico del mundo. Su presencia está ligada a la existencia de los seres vivos en el planeta. Sin aquella, no podrían sobrevivir los seres vivos, incluyendo el hombre.

Una gran cantidad de autores se han referido al problema del agua y su dimensión económica, social y ambiental en el mundo (Jhonson, et al., 2001; Vaux, 2002; Kulshreshtha, 1998; UNESCO, 2001; WRI, 2001). Al respecto, el documento de la Agenda 21 (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1992) en su Capítulo 18 sobre Conservación y Gestión de los Recursos, dice textualmente:

“El agua se necesita en todos los aspectos de la vida. El objetivo general es velar por que se mantenga un suministro suficiente de agua de buena calidad para toda la población del planeta y preservar al mismo tiempo las funciones hidrológicas, biológicas y químicas de los ecosistemas, adaptando las actividades humanas a los límites de la capacidad de la naturaleza y combatiendo los vectores de las enfermedades relacionadas con el agua.”

Es evidente en este párrafo la importancia que despierta el agua a nivel mundial; sobre todo, a partir de los problemas que enfrenta el recurso para permanecer como recurso disponible al consumo humano. También en el mismo capítulo, la Agenda 21 destaca lo siguiente (el subrayado es del autor): “La escasez generalizada de recursos de agua dulce, su destrucción gradual y su creciente contaminación, así como la implantación progresiva de actividades incompatibles en muchas regiones del mundo, exigen una planificación y una ordenación integradas de los recursos hídricos. Esa integración ha de abarcar todos los tipos de masas interrelacionadas de agua dulce, tanto las aguas superficiales como las subterráneas, y ha de tener debidamente en cuenta los aspectos de la cantidad y calidad del agua.”

El agua tiene la mayor relevancia para el ser humano y es por ello, que en las últimas décadas la preocupación de la humanidad se ha volcado a través de los organismos mundiales, a la solución de los problemas derivados de su disponibilidad, accesibilidad y vulnerabilidad, ya que de la solución que se

ofrezca a dichas problemáticas dependerá en gran medida la sobrevivencia misma del hombre.

Desde el punto de vista del recurso hídrico como elemento natural de la Tierra, podemos pensar que el agua es un elemento que tiene diversas características que la hacen única en importancia: es un compuesto fundamental en la mayoría de los procesos biológicos, es también el elemento universal por excelencia y posee virtudes de disolución de otros compuestos y elementos que son únicas. Sin embargo, es también un recurso frágil que requiere en algunos casos de miles de años para ser renovada (como en el caso de acuíferos), mientras que en los procesos biológicos puede requerir apenas unas horas (Shiklomanov, 2001). Asimismo, como recurso renovable su principal característica y más evidente, es la variabilidad que muestra tanto en el espacio como en el tiempo lo que convierte al agua en un componente del paisaje muypreciado en zonas de escasez y poco valorado en zonas de abundancia.

Para darnos una idea de la importancia que tiene el agua en la vida de todos los seres vivos y en el funcionamiento del ciclo hidrológico, debemos entender que el recurso agua se halla en todos los procesos biológicos, físicos y sociales del medio natural y antrópico. Su presencia determina el funcionamiento mismo de la naturaleza en general y del medio humano en particular. El hombre, por su parte, ha venido generando problemáticas más complejas que limitan la disponibilidad del agua y aumentan su vulnerabilidad debido sobre todo al crecimiento poblacional y al uso indiscriminado de tecnologías que afectan el clima global (Sophocleous, 2004). De esta forma, el agua se ha vuelto importante no solo por su omnipresencia natural, sino también y sobre todo ahora, por su escasez.

De acuerdo con Shiklomanov (2001), del agua total de la Tierra, solo el 2.5% es agua dulce y de ésta cantidad, el agua dulce disponible que se encuentra en los ríos, lagos y reservorios, representa poco más del 0.20 %, lo que nos da una idea de su “abundancia” en la forma en que los humanos la requerimos (Figura 1).

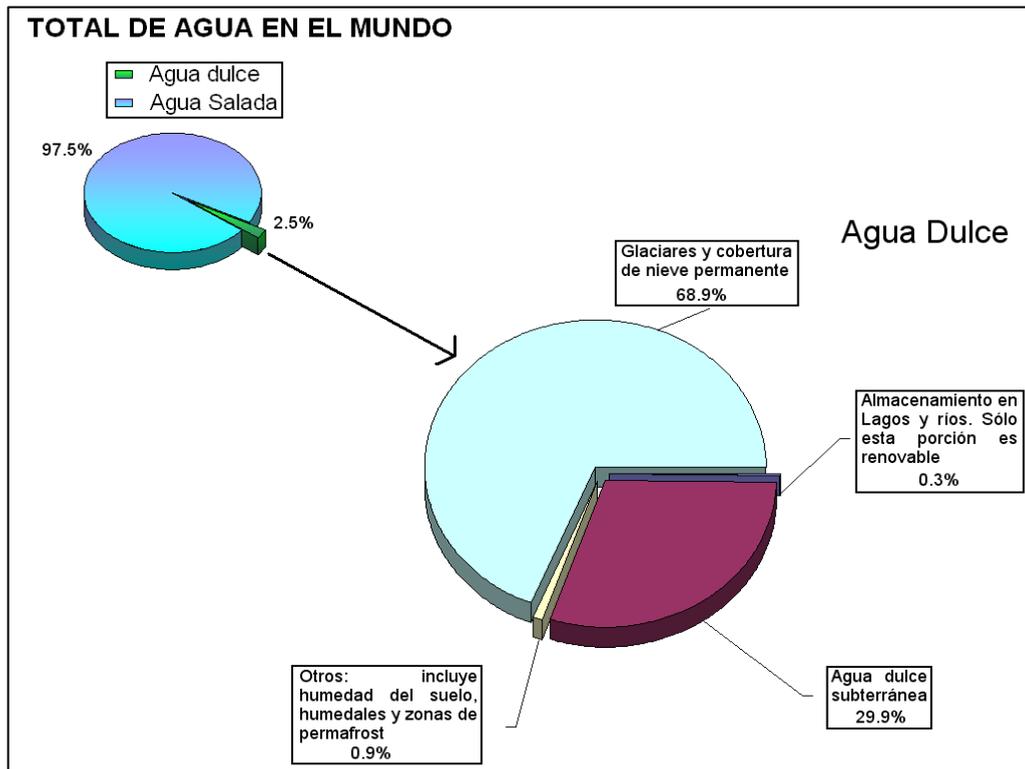


Figura 1. Disponibilidad de agua dulce en el Mundo
(Adaptado de Shiklomanov, 2001)

El agua en el mundo, implicaciones de la oferta y la demanda

De acuerdo con diversos autores y los diagnósticos sobre el recurso agua elaborados por la UNESCO (2003), el Pacific Institute (2000) <http://www.worldwater.org/table1.html>, la FAO (2003) http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/water_res/index.stm y el World Resources Institute, (2003) o WRI por sus siglas en inglés, http://water.wri.org/pubs_description.cfm?PubID=3818, el agua en el mundo atraviesa por la más severa de sus crisis. Esta crisis tiene diversas y variadas formas de expresarse y es el resultado concatenado de muchos factores derivados del mal manejo del agua que incrementará el estrés de este recurso en el 60% del planeta (WRI, 2003). La disponibilidad de agua en el mundo disminuye drásticamente año con año y los efectos de esta escasez se relacionan con fenómenos sociales como la pobreza, la desigualdad social y el deterioro en la calidad de vida (UNESCO, 2003). Por otra parte, el programa AQUASTAT de la FAO iniciado en 1993 (sistema mundial de información sobre el agua y la agricultura de la FAO) es el sistema que reúne, analiza y divulga datos e información por países y regiones para ofrecer a los usuarios interesados en el análisis nacional, regional y mundial la información disponible más precisa, fiable, coherente y actual sobre los recursos hídricos y la gestión

del agua en la agricultura. Dicho programa señala que el total de recursos de agua en el mundo es de 43,750 km³ año⁻¹. Por su parte, el agua por habitante por continente muestra, sobre todo, una gran desigualdad; en el continente americano se localiza la mayor cantidad del recurso, con el 54.8%, en tanto que el asiático cuenta con 7.8% del total mundial. El Cuadro 1 muestra la distribución del recurso hídrico y su relación con la población en cinco continentes.

Cuadro 1. Cantidad de recursos hídricos en el Mundo y su comparación con la población mundial (FAO, 2003).

Continente	Recursos hídricos (m ³ hab ⁻¹ año ⁻¹)	Porcentaje de recursos hídricos	Población	Porcentaje de la población mundial
América	24,000	54,8	828,062,363	13,71
Europa	9,300	21,3	727,835,000	12,04
Africa	5,000	11,4	793,288,000	13,13
Oceanía	2,050	4,7	25,388,537	0,42
Asia	3,400	7,8	3,667,615,000	60,70
TOTAL	43,750	100	6,042,188,900	100

Así, el 25.7% de la población de América y Europa cuenta con el 76.1% de los recursos hídricos, en tanto Asia, con poco más del 60% de la población mundial, cuenta apenas con el 7.8% de los recursos hídricos mundiales. Estas cifras evidencian la desigualdad en la disponibilidad de recursos de agua. Por ejemplo, tan solo nueve países considerados como los gigantes del mundo en cuanto a recursos hídricos internos, concentran el 60% del agua dulce mundial (FAO, 2003).

Las cifras en cuanto al futuro del agua, son alarmantes. De acuerdo con Kulshreshtha (1998), la escasez grave de agua podría afectar a 7 mil millones de seres humanos de 60 países en el año 2050, lo que supone un incremento en su vulnerabilidad. Dicho autor, determinó que la vulnerabilidad del recurso agua en el escenario más pesimista afectará a 61 de 145 países analizados, es decir a más de 5 mil millones de habitantes. El escenario más optimista afectaría a 42 de 145 países, o sea a 2800 millones de personas en el mundo. El Cuadro 2 resume los datos más significativos con respecto a la crisis mundial del agua. Esta crisis también ha servido para insistir que se necesita una nueva política de gestión del agua encaminada a regular y restringir el acceso a ella, su distribución y su uso; desafortunadamente, los modelos de gestión que se impulsan tienen una clara tendencia a la privatización de los recursos naturales y se asocian solo al proceso de incrementar la oferta de agua (Davila, 2006).

Cuadro 2. Problemas del agua en México y el Mundo.

Problemas	Mundial	México
Cantidad de recursos de agua dulce	43,764.3 km ³	1,512 Km ³
Estaciones hidrométricas	38,600	2,014
Estaciones hidrométricas para evaluación del recurso agua	2,350	ND
Países con estrés hídrico (20% de recursos utilizados para riego)	36 o 23 %	-
Carga mundial de contaminación	12 mil km ³	
Hectáreas regadas	250 mill. has =17 %	6.2 mill. de has
Disponibilidad de agua dulce		**4,210 m ³ hab ⁻¹

(FAO, 2003; **CONAGUA, 2008)

Ante este escenario adquiere mayor significado y dimensión el concepto de **gestión integral de los recursos hidráulicos (GIRH)**, que de acuerdo con el Comité Consultivo Técnico de la Asociación Mundial del Agua (GWP), se puede describir como: un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con estos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales. En diversos foros se ha generalizado la idea de que la crisis del agua, es fundamentalmente una crisis de gestión. Esto significa que la problemática del agua es transversal, que se sitúa en el campo de las políticas públicas, la medición y control de los sistemas hidrológicos, la negociación y regulación entre los factores sociales, económicos y políticos.

Impacto del cambio climático en la oferta y demanda de agua.

Otro aspecto de vital importancia es la relación del recurso agua con el cambio climático.

La hidrosfera tiene importancia en la regulación climática, pero también es afectada por las variaciones que se suceden en el sistema climático global. De esta forma, es previsible que el cambio climático global afecte los procesos del ciclo hidrológico y por ende los problemas relacionados con el agua, tales como la demanda, la oferta, la vulnerabilidad, la calidad y en consecuencia, su disponibilidad (Kundzewicz and Somlyódy, 1997). Estos autores citan otros trabajos en los que se ha definido que con el aumento de la temperatura y la disminución de la lluvia, el escurrimiento superficial podría caer hasta en un 70%, y que las variaciones estacionales del escurrimiento en secas y lluvias podrían ser, respectivamente, del 84% y del 40 % más. Ello sugiere que los cambios en el ciclo hidrológico podrían ser significativos en términos de eventos máximos o estacionales con variaciones pequeñas en la temperatura y la precipitación (Nemec and Schaake, 1982; Schaake, 1990, citados por Kundzewicz and Somlyódy, 1997)

En 1997, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés)

refiere que el impacto sobre el ciclo hidrológico será mayor en zonas desérticas y semidesérticas, así como en lagos y corrientes de agua en cuencas con mayor evaporación (como en el caso del Balsas, en México, por ejemplo). Asimismo, en cuencas que no tengan grandes áreas de captación y tiempos de retención relativamente cortos, en lagos profundos y escurrimientos que no cuenten con refugios térmicos apropiados (zonas deforestadas por ejemplo), y también en "...zonas de irrigación que dependen de reservorios aislados y/o de sistemas alimentados por fusión de nieve que dependen muy estrechamente de nevadas estacionales..." (IPCC, 2000).

El mismo organismo establece también que las principales implicaciones del calentamiento global sobre el ciclo hidrológico se verán agravadas por impactos adicionales debido al crecimiento poblacional y al mal manejo del consumo de agua, afectando así la oferta de este recurso en muchas regiones. Estos efectos del cambio climático sobre el agua plantean retos respecto a su manejo (abasto, oferta, demanda, calidad del agua, etc.). Retos que no son fáciles de enfrentar porque los efectos del cambio climático sobre el recurso hídrico son todavía inciertos.

A pesar de ello, algunos modelos sobre esta temática sugieren el aumento del escurrimiento promedio anual en altas latitudes, y su disminución en latitudes medias y subtropicos (Arnell, 1999), mientras que la mayoría sugiere el aumento de temperatura contra una disminución de la precipitación y consecuentemente del escurrimiento (Ragab and Prudhomme, 2002; Huntington, 2003), todo lo cual afectaría directamente la oferta de agua en el planeta.

En el caso del Tancítaro existe aparentemente una tendencia a reducir la cantidad de lluvia anual como el retraso del inicio del periodo de lluvias (Figuras 2 y 3). En las gráficas anuales se aprecia una tendencia a la baja de la cantidad de lluvia en cuatro estaciones con registros disponibles que circundan al Tancítaro y localizándose muy cerca del estratovolcán. En el caso de las gráficas mensuales se escogió el mes de mayo porque es el mes en que inician las lluvias en dicha región. Como se puede observar, las lluvias frecuentemente no ocurren en ese mes, lo que se puede interpretar como retrasos en el establecimiento de las lluvias.

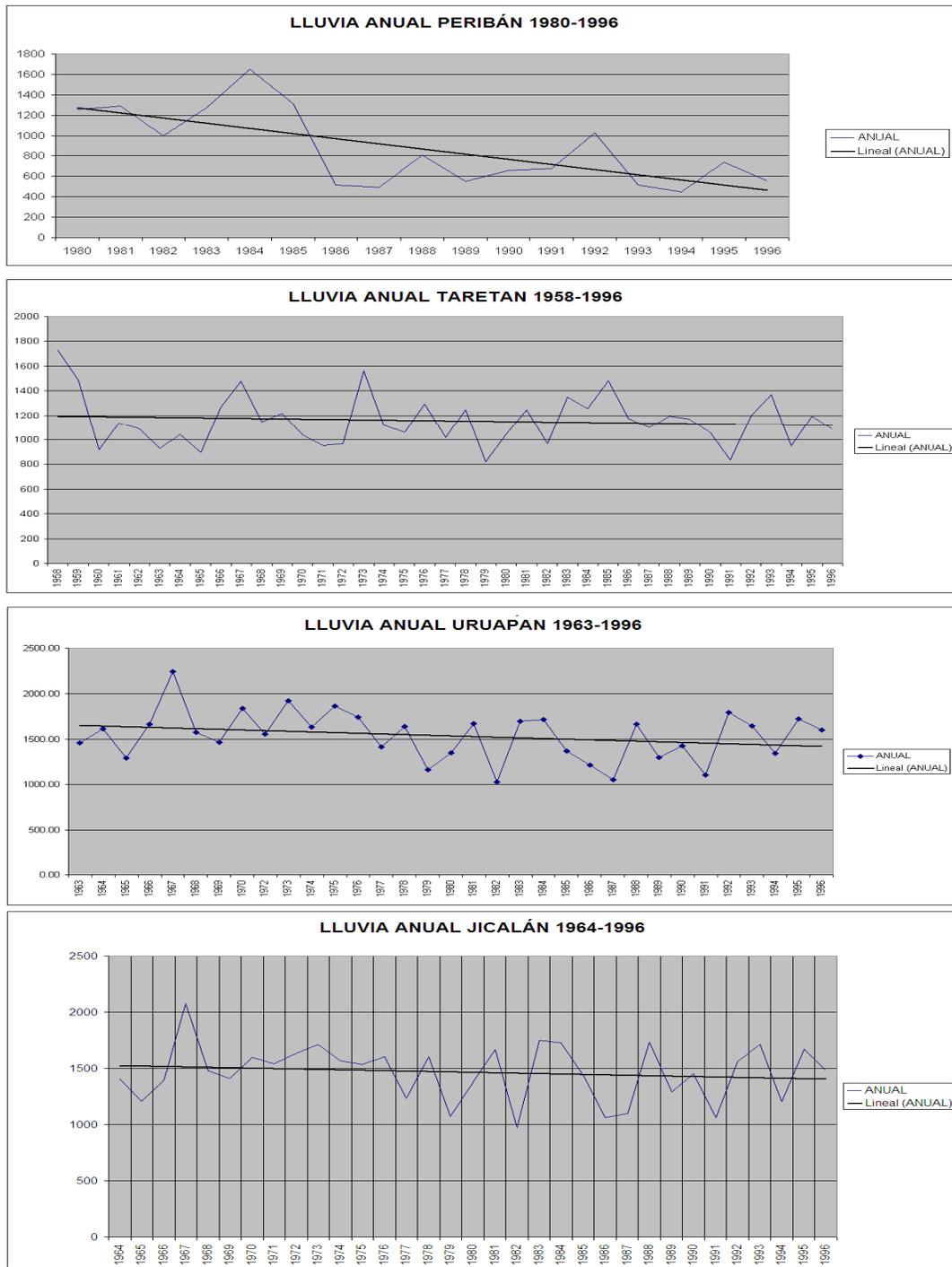


Figura 2. Tendencia de las lluvias en periodos escogidos para cuatro estaciones climatológicas cercanas al Pico de Tancitaro.

Estas tendencias muestran al menos, que el Tancitaro es una montaña frágil desde el punto de vista climatológico y que el sistema hidrológico podría verse amenazado por cambios en el patrón y cantidad de lluvias y con ello, el abasto y disponibilidad de agua en el curso del siguiente decenio.

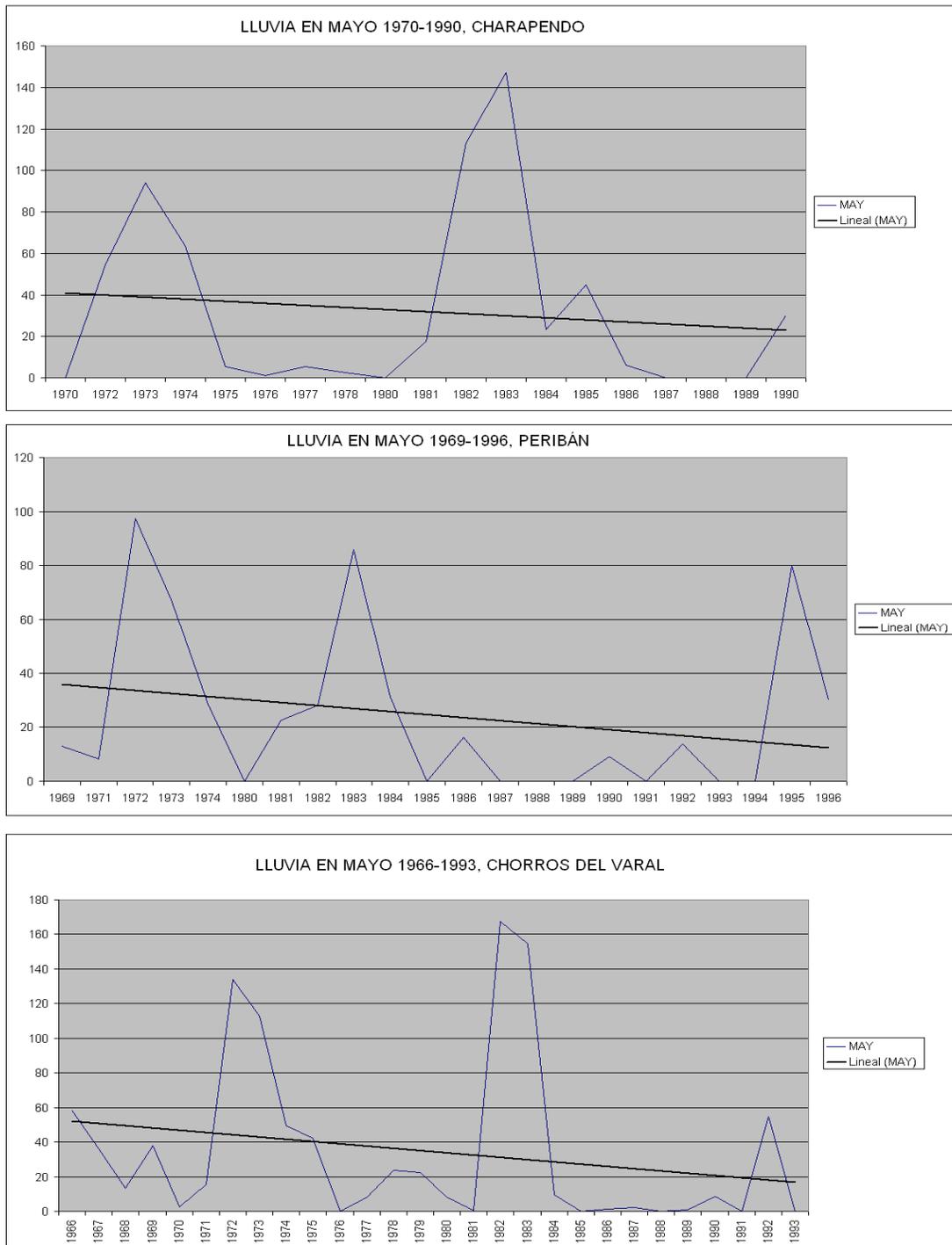


Figura 3. Gráficas que muestran tendencia al retraso de lluvias para el mes de mayo, en estaciones seleccionadas cercanas a Tancítaro. El retraso se manifiesta por el registro en 0 mm de lluvia.

De manera aproximada estaría iniciándose una baja creciente de la oferta de agua en los escurrimientos y manantiales que drenan el Tancítaro como producto de la disminución de las lluvias, esto a su vez por

influencia del cambio climático.

Por otro lado, en un contexto más global, estos problemas también se han analizado para el agua subterránea. Eckhardt and Ulbrichb, (2003), utilizaron el modelo SWAT aplicándolo a la predicción de impactos potenciales del cambio climático sobre la recarga media anual subterránea y el escurrimiento para una cuenca de Europa Central. Sus resultados muestran que dicha recarga podría reducirse hasta en un 50% afectando la calidad del agua, la oferta y la generación de energía eléctrica.

Perfil hidrológico de México, la oferta y demanda nacionales.

Nuestro país tiene como principal característica hidrológica la desigual distribución de agua en todo su territorio. Así, desde el punto de vista climático, México posee una gran variación en la distribución, temporalidad y frecuencia de la precipitación. Por ejemplo, existen sitios con precipitaciones anuales mayores a los 4,000 mm, como en la Sierra Norte de Puebla, y lugares donde la precipitación ronda apenas los 40 mm año⁻¹, como en ciertas regiones de Sonora (Figura 4). Estas variaciones pluviales hacen de nuestro territorio un complejo climatológico que se refleja en diversos aspectos del medio natural y social, como sucede con la presencia de diversos tipos de vegetación y productividad del maíz, por ejemplo, a lo largo y ancho del país. Pero sobre todo, con la presencia de diversos regímenes de escurrimiento, cuya variación espacial, temporal y volumétrica está determinada por la precipitación, la evapotranspiración y por el uso del suelo.

Por otra parte, los ríos de México suelen ser cortos en su longitud, con origen en ambientes montañosos y de poco caudal, además de predominar los que son estacionales respecto de aquellos que son permanentes. Todo esto depende de la ubicación geográfica de nuestro territorio en el hemisferio norte entre los 14° de latitud y los 34° de latitud, atravesando el Trópico de Cáncer. Dicha ubicación ha motivado la influencia de vientos alisios provenientes del NE que proveen humedad del Golfo de México. Sin embargo, esta humedad se ve modificada por al menos dos factores: la presencia de una orografía compleja que impide la llegada de esta humedad al centro y altiplano de México, con el consiguiente efecto de continentalidad, y la presencia en el norte de condiciones de sequedad motivados por la latitud y la influencia de la circulación general de los vientos provenientes del oeste, más secos y elevados.

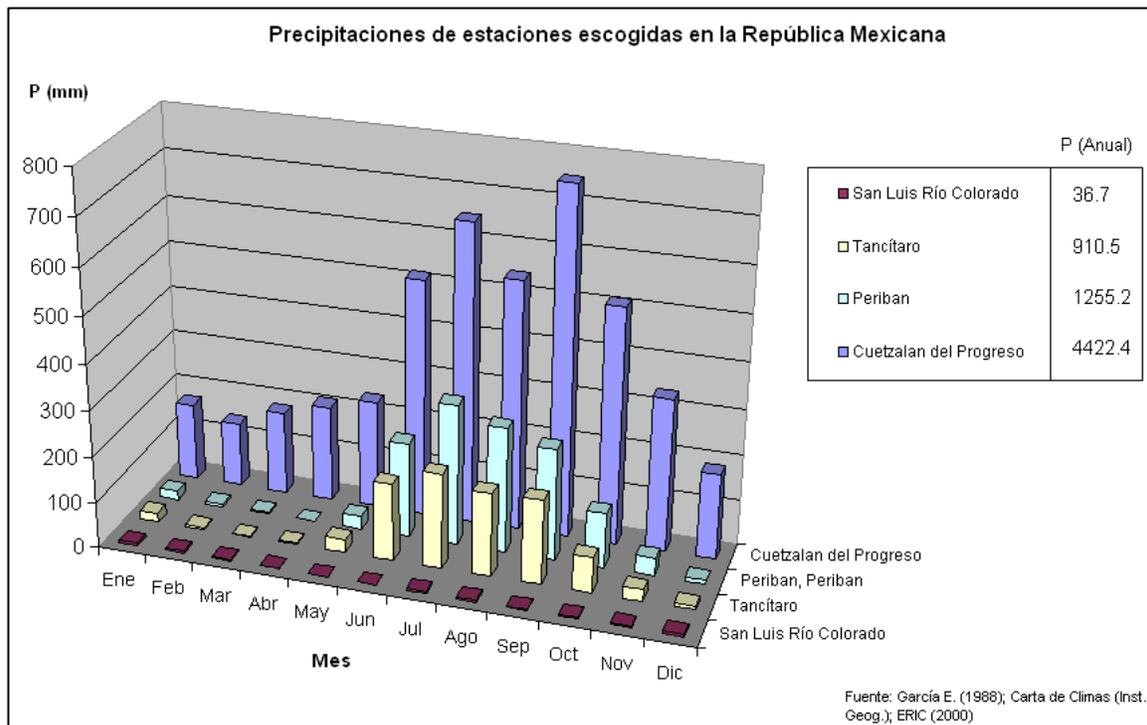


Figura 4. Comparación de las precipitaciones mensuales y anuales (en mm) para cuatro estaciones escogidas de la República Mexicana.

En menos del 30% del territorio nacional se localiza el 60% de los recursos de agua superficial, sirviendo a menos del 30% de la población. Por otro lado, más del 70% del territorio se localiza en zonas áridas y semiáridas con menos del 30% del recurso hídrico superficial abasteciendo a poco más del 70% de la población mexicana.

De acuerdo con Aquastat (2000), México ocupa el lugar 136 del mundo en disponibilidad *per cápita* de agua con $4,977 \text{ km}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ año}^{-1}$, que significa una disponibilidad baja; sin embargo, en el norte, centro y noreste del país, donde habitan el 77% de la población apenas existe $1300 \text{ m}^3 \text{ per capita}$, categoría extremadamente baja de acuerdo con parámetros internacionales.

Cuadro 3. Balance hídrico de la República Mexicana.

Precipitación media anual (mm)	Volumen total de agua (km^3)	Recursos internos renovables (km^3)	Pérdidas por evapotranspiración (km^3)	Escurrimiento. Sup. (km^3)	Recarga natural media de acuíferos (km^3)	Recursos hídricos totales renovables (km^3)	Disponibilidad <i>per cápita</i> ($\text{m}^3 \text{ hab}^{-1}$)
772	1,512	409	1,064.7	410	48	458	4,977

Fuente: CNA, 2004.

El Cuadro 3 y la Figura 5 representan el balance hídrico para el país (CNA, 2004); de ellos se desprende que del volumen total de agua, apenas un 28% corresponde a los recursos hídricos renovables, y 70% corresponde a las pérdidas por evaporación, lo que explica la baja oferta hídrica nacional.

El Cuadro 4 muestra claramente los problemas del manejo de agua así como las desigualdades en su distribución natural. Por un lado, observamos que a nivel nacional, la disponibilidad asciende a poco más de 4,800 m³, mientras que la extracción total bruta de agua asciende a 72,183 hm³, contra los poco más de 75 mil hectómetros de recarga media de acuíferos. Lo anterior nos indica la urgencia de controlar y manejar adecuadamente el recurso pues nos encontramos en un punto crítico del aprovechamiento de este recurso, que puede comprometer la estabilidad, gobernabilidad y la capacidad misma de subsistencia de nuestra nación. Por regiones y destacando la región del Balsas, observamos que la región con mayor disponibilidad *per cápita* corresponde a la región de la Frontera Sur con 26,791 m³, mientras la región con menor disponibilidad es la del Valle de México con apenas 196 m³ mientras que la región del Balsas presenta disponibilidad *per cápita* baja en cuanto al recurso hídrico superficial, con apenas 2,844 m³ por habitante.

Cuadro 4. Balance hídrico por regiones.

Región administrativa		Precip. media histórica (1941-2000) (mm)	Disp. natural base media (hm ³)	Disp. natural base media per-cápita (pob. 2000) (m ³ /hab)	Esc. sup. virgen medio (hm ³)*	Recarga media de acuíferos (hm ³)	Extracción total bruta de agua (2000) (hm ³)
I	Península de Baja California	199	4 425	1 610	3 012	1 413	3 836
II	Noroeste	476	7 950	3 398	5 459	2 491	6 028
III	Pacífico Norte	684	24 474	6 311	21 933	2 541	9 224
IV	Balsas	806	28 191	2 844	24 273	3 918	7 730
V	Pacífico Sur	1 125	33 133	8 334	31 468	1 665	1 557
VI	Río Bravo	449	14 261	1 512	9 204	5 057	8 010
VII	Cuencas Centrales del Norte	496	6 802	1 791	4 729	2 073	4 172
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	671	39 479	2 084	32 370	7 109	14 514
IX	Golfo Norte	917	24 339	5 123	23 071	1 268	5 217
X	Golfo Centro	1 549	102 633	11 136	98 930	3 703	3 946
XI	Frontera Sur	2 258	155 906	26 791	139 004	16 902	1 841
XII	Península de Yucatán	1 290	26 496	8 146	1 348	25 148	1 307
XIII	Valle de México	797	3 802	196	1 996	1 806	4 801
	Nacional	772	471 891	4 841	396 797	75 094	72 183

Los volúmenes de extracción total bruta de agua son estimados. (a) Incluye 1 850 hm³ provenientes del Río Colorado. (b) Incluye aproximadamente 50 000 hm³ provenientes de Guatemala. (c) Se consideran aguas residuales de la Ciudad de México. * Datos preliminares. Disponibilidad natural base media = escurrimiento superficial virgen medio + recarga media de acuíferos. Disponibilidad natural base per-cápita = (escurrimiento superficial virgen medio + recarga media de acuíferos)/habitantes en el 2000.

(Tomado de CNA, 2004)



Fig. 5. Balance hidrológico de México.

Fuente: SEMARNAT, 2002.

En cuanto a la extracción de agua, la región que más agua extrae es la que corresponde al Lerma-Santiago-Pacífico con 14,514 hm³ ⁽¹⁾, siendo la de menor extracción la región de la Península de Yucatán. Comparativamente, es de destacar que la extracción para el Balsas asciende a 7,730 hm³ que equivalen a poco más del 10% del total nacional, por lo que podemos considerar que dicho volumen es alto si consideramos la extensión de la región del Balsas en comparación con las demás regiones.

En el caso de México, el IPCC en el año 2000, preveía un escenario difícil como producto del impacto del cambio climático sobre la disponibilidad anual de agua ya que pasaría de los 4,720 m³hab⁻¹, a un posible escenario pesimista de entre 1,740 y 2,010 m³hab⁻¹ en el año 2050.

¹ El **hectómetro cúbico** (hm³), es una medida de volumen que equivale a mil millones de litros. Fuente: WIKIPEDIA : http://es.wikipedia.org/wiki/Hecto%3%B3metro_c%3%BAbico

La Comisión Nacional del Agua (2008) prevé asimismo, el siguiente escenario de disponibilidad natural media del agua tomando como referencia de inicio el año 1950, hasta el horizonte del año 2030:

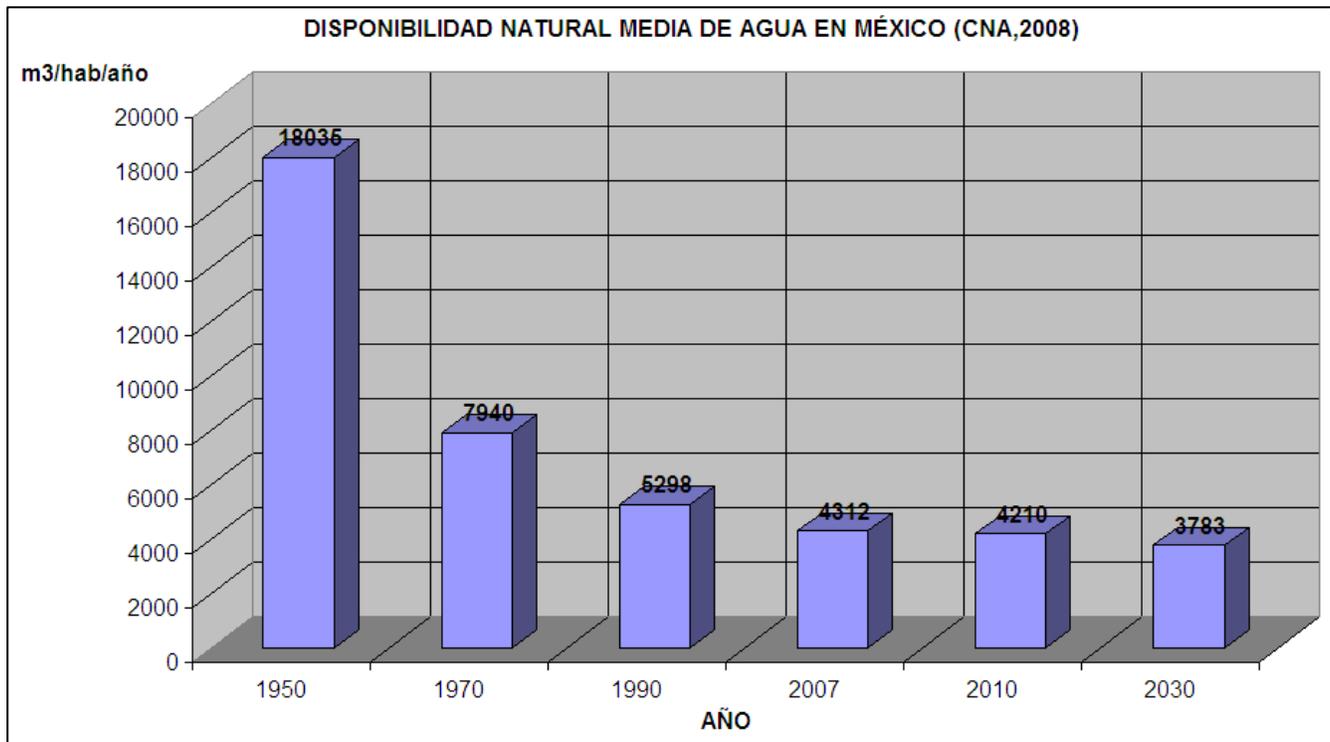


Figura 6 Disponibilidad natural media de agua en México (CNA, 2008)

Como puede observarse, de 1950 a 2010, la disponibilidad se ha reducido en más de 4 veces y para el 2030, la expectativa es que la disponibilidad se reduzca en poco menos de 6 veces respecto a 1950. Es decir, que nos aproximamos rápidamente a escenarios muy graves de crisis y vulnerabilidad del agua para el país.

Disponibilidad de datos y enfoques de estudio

El análisis de los recursos naturales, en general, requiere de datos y sistemas de monitoreo que permitan conocer a fondo su comportamiento. En México, el monitoreo y evaluación a través de series de tiempo sobre algún recurso en particular todavía es incipiente. En el caso del agua, de acuerdo con CNA (<http://www.cna.gob.mx>), en México existe un total de 2014 estaciones hidrométricas (estaciones de aforo) para un territorio de casi dos millones de kilómetros cuadrados (Figura 7). Es decir, que a cada estación le correspondería un área de aproximadamente 972 km² suponiendo que estuvieran distribuidas en forma regular dentro del territorio. Otro tanto sucede con las estaciones meteorológicas, cuya distribución está más ligada a las zonas agrícolas irrigadas, mientras que faltan estaciones para

otras zonas, lo cual dificulta el análisis de disponibilidad del recurso (Salinas, 1998).

En este marco de escasez e irregularidad en la disponibilidad de datos y de infraestructura, la estimación del recurso agua (su volumen, escurrimiento, etc.) es una práctica común sobre todo en países con escaso desarrollo. Para ello se han utilizado diversos métodos indirectos enfocados a establecer las características mínimas que permitan conocer el comportamiento, cantidad y volúmenes de este recurso. Estos enfoques se han utilizado para las estimaciones requeridas en el diseño de presas o bien para establecer el balance hidrológico de alguna región en particular como en Ávila (1996).



Figura 7. Mapa de la República Mexicana mostrando la localización de estaciones hidrométricas en el País.

Fuente: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (2002). 'Estaciones hidrométricas'. Extraído de 'Bandas (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales)' del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). CNA. (1997). México; Mapa editado en Google Earth.

Por otro lado, es necesario desarrollar nuevos esquemas de investigación sobre balances de agua, es decir, se requiere transitar de los estudios estáticos tradicionales de balances de agua con base en el análisis de registro históricos, a otro nivel que considere a los procesos hidrológicos bajo condiciones

dinámicas para periodos más cortos (ejem. anuales o estacionales) con el apoyo de los sensores remotos y sistemas de información geográfica, cuyos resultados se puedan incorporar a la planeación anual del recurso agua a niveles municipales y locales.

El planteamiento es central en los términos de un enfoque conceptual más práctico pero también en cuanto a la incorporación de herramientas múltiples de diagnóstico que abarcan el ámbito social inclusive, siendo éste un tema poco incorporado en este tipo de trabajos. Además de lo anterior, el problema de balance hídrico es incorporado en este estudio desde un punto de vista geográfico (territorial) en donde no solo se trata el tema de la estimación hídrica superficial sino que se establecen relaciones espaciales que reflejan el desarrollo del paisaje en función del recurso agua y su manejo, es decir, atiende al paisaje en tanto construcción social y no solo ambiental.

Existe una buena cantidad de trabajos sobre el agua, donde el tema central es la estimación del recurso o de los parámetros de sus cuencas de captación (Xu, 1999; Pandey et al., 2002; Mendoza, 2002; Jacobs and Srinivasan, 2005; Smakhtin, 2001; Abulohom, et al., 2001; Bohn y Campo, 2007; Gonzalo et. Al., 2004).

La estimación de datos, especialmente de datos que tienen que ver con la medición del agua de escurrimiento, o de la lluvia o bien de parámetros meteorológicos en general, como ya se mencionó, es común en países como México cuya carencia de estaciones permanentes de aforo o meteorológicas es evidente. Por ejemplo, la estación hidrométrica más cercana al Tancitaro es la del Río Cancitas en el Balsas a poco más de 25 km al sureste en línea recta. De ahí, se presentan otras más pero cada vez más lejos del área de estudio, pero ninguna dentro del área de estudio (Figura 8)

Por otro lado, en general cuando se tienen mediciones e incluso series de tiempo de dichas mediciones, los estudiosos optan por elaborar modelos que se calibran usando parte de los datos de dichas estaciones. El procedimiento permite asegurar el funcionamiento del modelo y se termina realizando validaciones científicas que nos dicen el grado de confiabilidad de los modelos aplicados.

Al respecto, la bibliografía arroja una gran cantidad de estos estudios en lo referente a estimaciones de parámetros hidrológicos del balance hídrico como el escurrimiento, la evapotranspiración, la infiltración y la recarga de acuíferos. Xu y Singh (1998), elaboraron una revisión de los modelos de

balance hídrico utilizados en la investigación del recurso agua. Los autores ejemplifican y comparan los diversos modelos que se han empleado desde los años 40's, tanto en el análisis de cuencas y el cambio climático, como en la evaluación del agua para el riego y el suministro de agua. Este artículo es valioso ya que nos indica cual ha sido la evolución de los modelos hídricos que requieren de datos o de diversos parámetros para su ejecución.

En cambio, el panorama se hace complicado cuando, debido a condiciones de escasez de datos e información es necesario estimar los elementos del balance hídrico, por ejemplo. En cualquier caso, siempre se utilizan datos mínimos que permiten hacer la estimación del parámetro solicitado. En el caso de tener que estimar, se recurre a modelos existentes como en el caso de la evapotranspiración a través del modelo ya conocido de Thornwaite y Matter (1955). También se pueden realizar mediciones rápidas que se ajustan mediante otros modelos, o bien a través de datos extrapolados de regiones semejantes al área de estudio, e incluso se combinan estos métodos para tener un mayor acercamiento a la realidad (Gonzalo, et. Al., 2004).



Figura 8. Estación hidrométrica más cercana al Pico de Tancitaro.

Fuente: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (2002). 'Estaciones hidrométricas'. Extraído de 'Bandas (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales)' del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). CNA. (1997). México; Mapa editado en Google Earth.

Es importante en este tipo de investigaciones, aceptar que el grado de incertidumbre en las estimaciones del balance hídrico superficial es mucho mayor que cuando se tienen datos duros. Sin embargo, las condiciones existentes en donde la toma de datos es nula o muy deficiente, hacen que la estimación adquiera importancia, siendo la clave para la resolución de este problema, la utilización de métodos cruzados y complementarios que disminuyan la incertidumbre en la que necesariamente se cae.

Un buen ejemplo de este tipo de estudios y que podemos considerar un antecedente directo es el de Gonzalo, et. Al. (2004) cuyo trabajo consiste en la definición de un índice de escasez de agua superficial con base en la determinación de la oferta y demanda de agua y es sobre esta problemática que se han construido los objetivos del trabajo.

Objetivos e hipótesis

Parte de los supuestos de este estudio es que es posible realizar diagnósticos y plantear escenarios sobre el potencial de los recursos en general y del agua en particular, mediante estimaciones que pueden ser controladas a través de metodologías múltiples que involucran un análisis multicriterio y multifactorial.

Este trabajo se inscribe en esta lógica. Y es por ello que las estimaciones adquieren relevancia en el conocimiento en este caso, de la oferta y demanda de agua de una zona que es prioritaria biológica, social y económicamente como el Tancítaro.

Los objetivos que se exponen enseguida van encaminados a demostrar la valía de las estimaciones del recurso agua en zonas donde no existen datos suficientes, son inexistentes, o se ocultan, y para un recurso que posee capital importancia para el desarrollo social y ambiental regional.

El Tancítaro, es en este caso, un excelente ejemplo de la importancia de estimar el recurso hídrico superficial con miras al manejo y administración del agua. Su ubicación estratégica, su importancia en todos los órdenes (biológico, ambiental o paisajístico, social y económico) y la posibilidad real de efectuar dicho balance, permiten asegurar que este estudio es relevante porque contribuye a la gestión del agua a través del conocimiento de los desequilibrios entre la oferta y la demanda del agua en el Tancítaro, a y además contribuye al debate científico sobre el análisis geográfico, que ha sido poco implementado a pesar de su importancia.

Objetivo general

Estimar la disponibilidad del agua superficial en el Pico de Tancítaro y formular escenarios de disponibilidad en función de la demanda social.

Objetivos particulares

Estimar la disponibilidad del agua superficial desde una perspectiva físico-geográfica.

Estimar la demanda social del agua superficial en la región del Tancítaro.

Formular escenarios de disponibilidad de agua en función de la demanda social.

CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL MEDIO FÍSICO Y SOCIAL.

El entorno ambiental del Tancitaro

El Pico de Tancitaro es la elevación de mayor altitud del Estado de Michoacán con 3860 msnm. Dicha elevación se localiza al centro-oeste del Estado de Michoacán, casi en los límites con el Estado de Jalisco (Figura 9). Desde la base del piedemonte hasta la cima, la superficie que cubre es de aproximadamente 60 mil hectáreas.

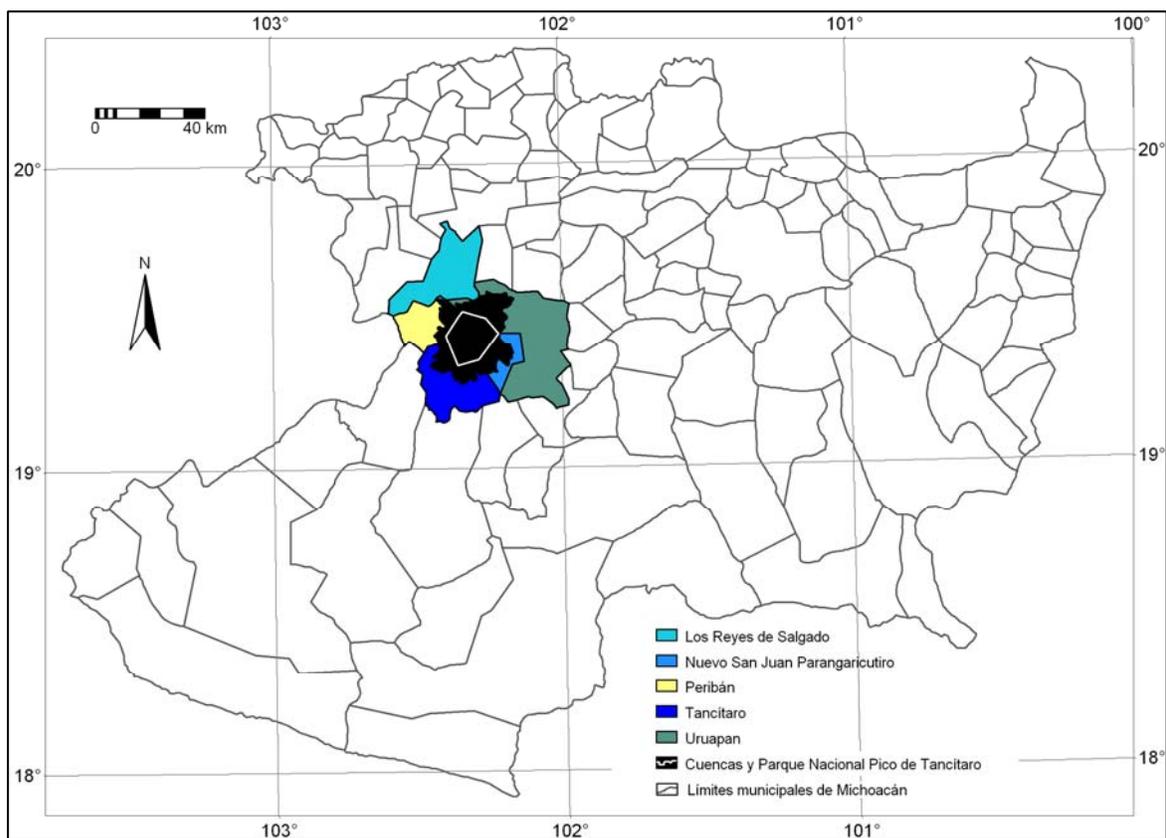


Figura 9. Localización del Pico de Tancitaro en el contexto de municipios, cuencas y parque nacional en el Estado de Michoacán.

De acuerdo con la carta de climas elaborada por CONABIO (2006) y con base en la clasificación climática de Köppen modificado por García (1988), se observa que los climas en la zona de estudio siguen un patrón subhúmedo. Dicho patrón se ve modificado por los aportes de humedad que la Depresión del Balsas ingresa hacia las laderas este, oeste y sur del Tancitaro, y por el fenómeno de continentalidad en la ladera norte (Figura 10 y Cuadro 5).

Cuadro 5. Características climáticas del Tancítaro.

Clima	Altitud característica (msnm)	Descripción climática	Tipo de vegetación predominante
(A)C(w ₂),		Semicalido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual >18°C, T mes mas frío <18°C, T mes mas caliente >22°C; P del mes mas seco <40 mm; lluvias de verano e índice P/T >55 y % lluvia invernal del 5-10.2% del total anual	Bosques de encino y encino pino, en cañadas la vegetación de galería presenta elementos de bosque mesófilo.
(A)C(w ₁)	1600-2000	Semicalido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual >18°C, T mes mas frío <18°C, T mes mas caliente >22°C; P del mes mas seco >40 mm; lluvias de verano e indice P/T entre 43.2 y 55, % lluvia invernal del 5-10.2% del total anual.	Bosques mixtos de encino-pino, matorral subtropical y vegetación de transición a selva baja caducifolia
C(m)		Templado húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, T mes mas frío entre -3°C y 18°C y T mes mas caliente < 22°C.	Bosques de coníferas (Abies y pinos) y en barrancas encinos con elementos de bosque mesófilo.
C(w ₂)	2000-3000	Templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, T mes mas frío entre -3°C-18°C, T mes mas caliente <22°C; P del mes mas seco <40 mm; lluvias de verano e índice P/T >55, % lluvia invernal del 5-10.2% del total anual.	Bosques mixtos, sobre todo de encino-pino, de coníferas (Abies y pinos) y bosque mesófilo.
Cb'(m)		Semifrío, húmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C , T mes mas frío entre -3°C y 18°C, T mes mas caliente < 22°C.	Bosques de Abies, y Pino, específicamente de <i>Pinus hartwegii</i> .
Cb'(w ₂)	Desde 3000	Semifrío, subhúmedo, verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C , T mes mas frío entre -3°C y 18°C, T mes mas caliente < 22°C; P en el mes mas seco < 40 mm; lluvias de verano, % lluvia invernal de 5 a 10.2% del total anual.	Predominan las coníferas, pero también se presentan de manera localizada (en cañadas angostas) bosquetes de Abies y encinos.

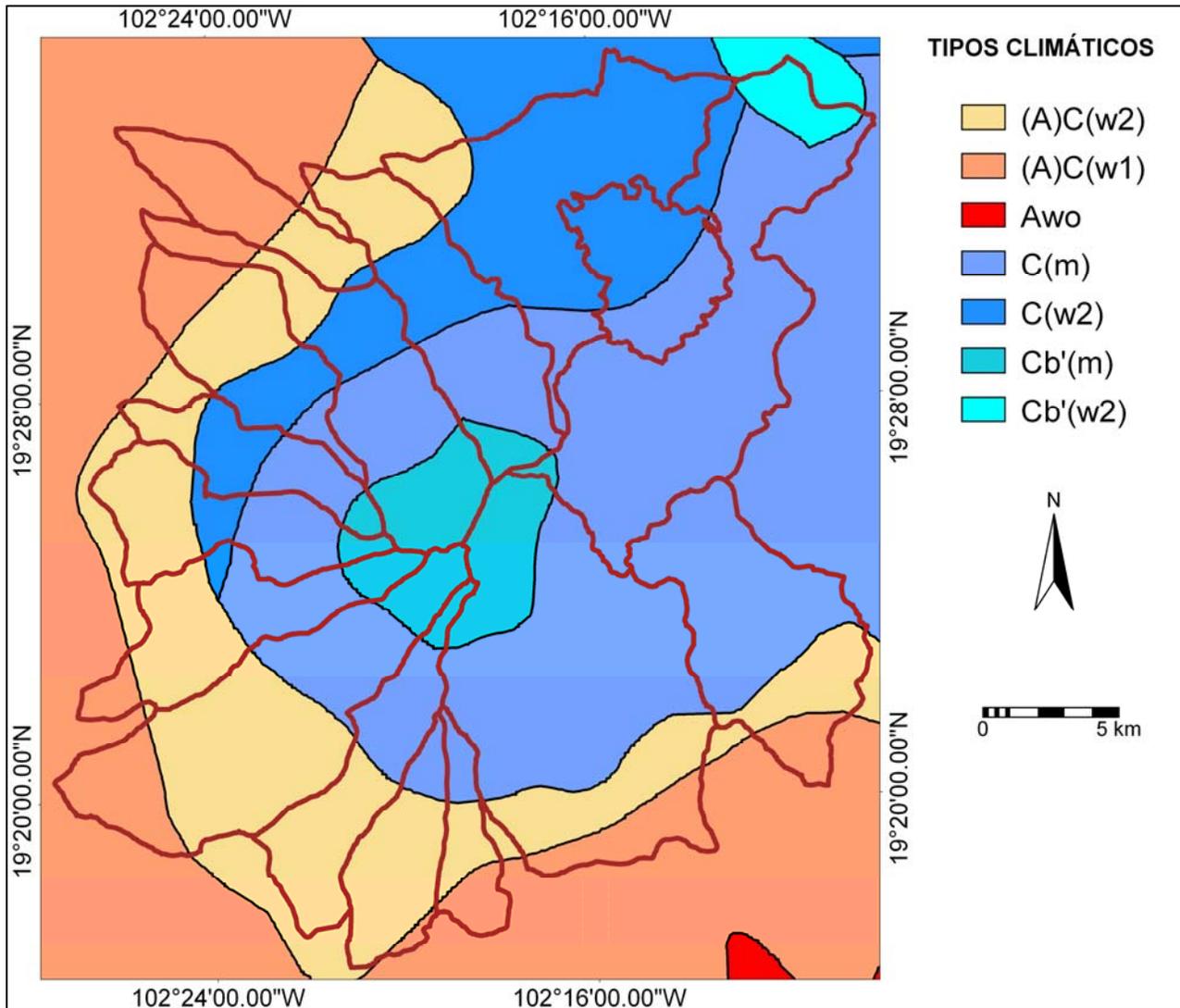


Figura 10. Climas presentes en la zona de estudio

(Datos de CONABIO, 2006; de acuerdo a la clasificación climática de Köppen modificado por García, 2004; y adaptados por el autor)

El medio físico

Geología

El Tancitaro y sus alrededores se encuentran dentro del Sistema Volcánico Transversal (SVT). Según Garduño *et al.* (1999), esta región es parte de la margen activa generada por la subducción constante del piso del Océano Pacífico (Placas de Kula, Farallón y Cocos). De igual forma, de acuerdo con el mismo autor, el área de estudio se localiza dentro de dos regiones:

- 1) La zona de distribución de los volcanes monogenéticos (originados por un solo evento de expulsión de lava y/o cenizas) entre los que se encuentra el Parícutín, y que se conoce como Corredor Tarasco

(CT). La región es reflejo de la actividad magmática de la Placa de Cocos que se ha manifestado a través del vulcanismo más reciente del estado (de 2.7 Ma. A la actualidad). Este vulcanismo se observa en tres grandes concentraciones de vulcanismo monogenético, de las cuales una está ligada al Parícutín que forma la de mayor importancia debido a la cantidad de manifestaciones que se observan.

2) La segunda región a la cual corresponde el Tancítaro se denomina “Volcanismo de la región de Zamora” (Garduño *et al.* (1999), y la actividad volcánica de esta área se presenta en forma de estructuras de grandes dimensiones generadas tanto por volcanes escudo (cerro Patamban) como por estratovolcanes (Tancítaro).

La distribución de estas estructuras está dada por la alineación en fracturas o fallas con dirección NE-SW correspondiente al SVT en general, y por alineamientos en dirección E-W y N-S. En el caso del Tancítaro, la intersección de dos sistemas de fracturas formadas por la zona de fallas Chapala-Oaxaca y las estructuras NE-SW del Corredor Tarasco explica su presencia. Además, el Tancítaro se agrupa en un conjunto de edificios compuestos de tipo andesítico de actividad explosiva que dio lugar a flujos piroclásticos y avalanchas en el pasado.

De acuerdo con la bibliografía más reciente (Scattolin, 1996; Ban *et al.*, 1992, citado por Garduño 1999), al Tancítaro le corresponde una edad de alrededor de 500 mil años ubicándolo como una estructura cuaternaria y más o menos reciente (Cuadro 6). Según Scattolin (1996), el parque nacional y sus alrededores presentan una serie de sistemas geológicos agrupados en un gran supersistema denominado La Culebra perteneciente a su vez, al llamado Distrito Volcánico del Tancítaro (DVT).

Los sistemas que lo comprenden son el de Zacándaro, el de Piedra del Horno y Nuevo San Juan Parangaricutiro. El sistema geológico de Zacándaro es el sustrato más antiguo y está compuesto de rocas volcánicas producto de lavas andesíticas y basálticas (dos tipos de rocas muy comunes en México). Debido a su edad presentan estados avanzados de desgaste formando barrancos y cañadas profundas con fuertes pendientes. Estas condiciones permiten en general, que el escurrimiento de las aguas superficiales sea más intenso y rápido lo que da lugar a una infiltración menor. El predominio del escurrimiento sobre la infiltración aumenta los caudales momentáneamente en esta zona produciendo una rápida respuesta a la concentración de las aguas en las salidas de las cuencas. A pesar de lo anterior, la existencia de rocas como el basalto con características de alta porosidad permite también

una rápida infiltración. En estos casos la infiltración aumenta disminuyendo el escurrimiento y por tanto, se incorpora más agua a los acuíferos. El sistema Piedra del Horno se compone principalmente de rocas andesíticas y conforman prácticamente todo el macizo del Pico de Tancítaro. Este sistema, y por ende el Pico de Tancítaro, se formó a partir de sucesivas emanaciones de lava a través de miles de años. La altitud alcanzada por dichas emanaciones permitió la acción de los hielos producto de la última glaciación. Estos hielos actuaron sobre el relieve resultando de esta forma valles y laderas con influencia de la erosión glaciaria de la que se han hallado pruebas de su pasado existente (Lorenzo Vázquez, comunicación personal).

El último y más reciente sistema de la región es el de Nuevo San Juan Parangaricutiro. Este sistema geológico se formó a partir del nacimiento de diversos volcanes monogenéticos y sus correspondientes emanaciones de lava (por lo general basáltica, aunque es frecuente encontrar lavas andesíticas). Es el relieve de montes y montañas más joven de la región y se caracteriza por haber dado origen al volcán más reciente de México: el Parícutín, cuya erupción inició en 1943 y terminó en 1952. Este sistema es importante porque existen zonas con lavas basálticas muy recientes que permiten la infiltración de agua a los mantos acuíferos. Por ello su ubicación y su conservación, son fundamentales en la recarga de agua para la alimentación de manantiales y para la oferta de agua del Tancítaro.

Cuadro 6. Geología del Distrito Volcánico de Tancítaro.

DISTRITO VOLCÁNICO DEL TANCÍTARO					
Unidad Sistemática		Unidad Litosomática	Rocas predominantes	Intervalo posible de ubicación estratigráfica	Edad (m.a.)
Supersistema	Sistema				
LA CULEBRA	Nuevo San Juan Parangaricutiro	Parícutín	Volcanes de lava y conos cineríticos. Lavas y bloques andesítico-basálticos, andesíticos y productos volcánicos de tipo basáltico ricos en olivino		1943d.C.
		La Escondida			
		Zirimóndiro			
		Parástaco			
		Los Amoles			
		La Uva			
	Tumbiscatillo				
	Piedra del Horno	Tancítaro	Andesita porfírica y dacita escoriácea		0.55+0.06
	Zacandaro	La Sidra	Productos andesítico-basálticos		
		Formación Zumpimito			

Tomado de Scattolin (1996).

Geomorfología

La geomorfología y el análisis del relieve siempre se han mencionado como elementos importantes en el análisis del recurso hídrico (Verstappen, 1983; Sthraler, 1997; Goudie, *et al.*, 1981; Gregory y Walling, 1985). En el caso del Tancítaro, las formas del relieve juegan un papel de primera importancia en los procesos hidrológicos.

Los datos que aquí se presentan forman parte de un capítulo del libro “*Las enseñanzas de San Juan. Investigación participativa para el manejo integral de recursos naturales*” editado por Alejandro Velázquez, Alejandro Torres y Gerardo Bocco y publicado por el INE-SEMARNAT en el 2003. El capítulo denominado “*El relieve como modelador y regulador de procesos en el paisaje*” de Fuentes y Bocco, aporta algunas conclusiones importantes que se refieren a las distintas unidades del relieve presentes y su papel en el comportamiento del recurso hídrico (Cuadro 7). Por ejemplo, las unidades de zonas altas se corresponden con áreas de infiltración principalmente, mientras las de altitudes medias del Tancítaro, cumplen una función reguladora tanto de la infiltración como del escurrimiento. Finalmente, las zonas más bajas se manifiestan de forma compleja, pero en general funcionan como las receptoras o zonas de descarga de los flujos subsuperficiales y superficiales del agua, manifestándose por una presencia abundante de manantiales así como en el caudal mayor de los mismos. De la misma manera, parte de los datos aquí presentados tienen como base la tesis de maestría del autor (Fuentes, 2000).

Cuadro 7. Unidades Geomorfológicas identificadas en el área del Tancítaro.

1. Estratovolcán Tancítaro.
1.1 Cimas
1.1.1 Superficie cumbral del Tancítaro
1.2 Laderas
1.2.1 Laderas externas
1.3 Valles
1.3.1 Valles de influencia glaciar y/o periglaciar predominante
1.3.2 Valles erosivos por dinámica fluvial predominante
2. Estructuras volcánicas monogenéticas
2.1 Conos volcánicos
2.1.1 Laderas estructurales de conos volcánicos
2.2 Domos volcánicos
2.2.1 Laderas de domos lávicos

Cuadro 7. Continuación. Unidades Geomorfológicas identificadas en el área del Tancítaro.

3.Derrames lávicos
3.1 Mesas de coladas de lava
3.1.1 Cimas
3.1.1.1 Superficie cumbral de mesa lávica
3.1.2 Laderas
3.1.2.1. Laderas de mesa lávica
3.2 Derrames lávicos
3.2.1 Cimas
3.2.1.1 Superficie cumbral de derrames lávicos
3.2.1.2 Superficiecumbral en laderas disectadas
3.2.2 Laderas
3.2.2.1 Laderas disectadas de derrames lávicos
3.2.2.2 Laderas de derrames lávicos
3.2.3 Superficie irregular de derrames lávicos recientes
4.Piedemonte
4.1 Laderas
4.1.1 Piedemonte superior
4.1.2 Piedemonte inferior
4.1.3 Valles erosivos de laderas escarpadas
5.Planicies
5.1 Planicies acumulativas
5.1.1 Planicie aluvial
5.1.2 Planicie aluvial interlávica
5.1.3 Planicie con cenizas
5.1.4 Planicie interlávica
Fuente: Fuentes, 2000.

El relieve es un elemento de gran importancia del espacio geográfico. Su análisis permite conocer el estado de otros componentes como el suelo o bien desarrollar la evaluación del paisaje, así como conocer las características hidrológicas de una región (Verstappen, 1983). La construcción de modelos geomorfológicos también puede permitir allegarse de soluciones prácticas para los problemas relacionados con la degradación del paisaje (Goudie *et al.*, 1981). De ahí que sea tan importante en el estudio del medio físico de cualquier lugar. Las geoformas presentes en el Tancítaro, corresponden a productos volcánicos y los sedimentos derivados de ellos, y por su ubicación en los límites del SVT son característicos las sierras y piedemontes (Figura 11). La zona se distingue por una intensa actividad volcánica desarrollada durante los últimos 500 mil años, que incluye la formación del volcán Parícutín que es la estructura volcánica monogenética más reciente del país, cuyo nacimiento y actividad se verificó hacia mediados del siglo XX.

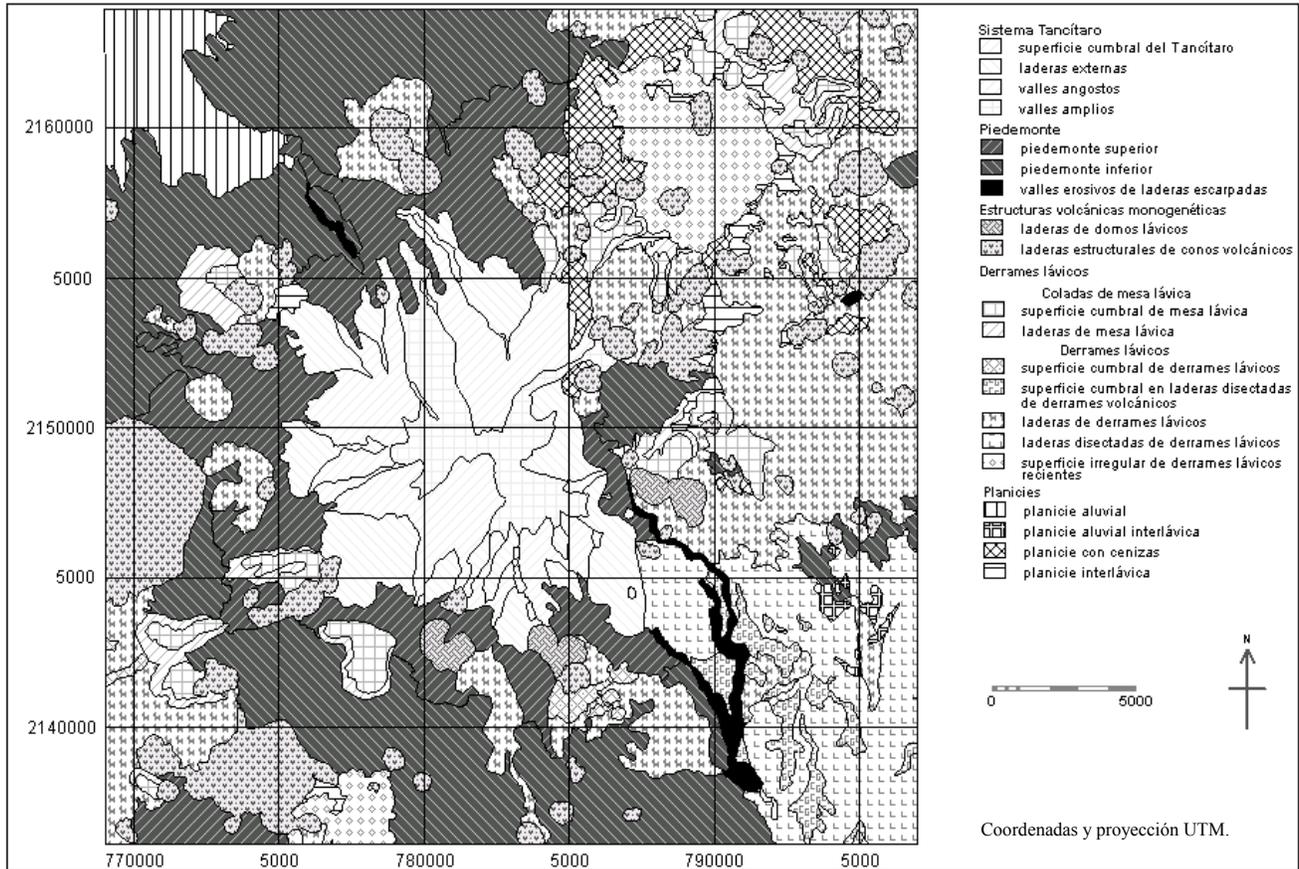


Figura 11. Mapa de unidades geomorfológicas del Pico de Tancítaro, Michoacán.

Fuente: Fuentes, 2000.

El Sistema montañoso Tancítaro es la elevación más importante del estado de Michoacán y asiento del parque nacional del mismo nombre. Su variabilidad altitudinal es impresionante (desde los 2,300 hasta los 3,860 msnm), pues sin considerar las zonas de la base de la montaña, denominadas piedemontes, la diferencia altitudinal es de 1,560 m y donde las distancias horizontales más grandes son ≤ 24 km lineales. En el Pico de Tancítaro se identificaron cinco unidades de relieve principales subdivididas en 13 subunidades secundarias, 20 unidades de tercer orden y 24 de cuarto orden. En este trabajo únicamente se describen las unidades de primero, segundo y tercer orden.

Formas del relieve estratovolcán Tancítaro

Esta unidad comprende todas las laderas altas y cimas del Tancítaro, compuesto a su vez, por unidades lávicas de tipo andesítico. Por la configuración geomorfológica de éstas, domina la presencia tanto de laderas con fuerte pendiente (desde 15° de inclinación hasta más de 30°) como de escarpes rocosos

generalmente por encima de los 3,500 msnm. Las superficies cumbreales que componen este macizo, en su mayoría son cimas agudas y presentan procesos periglaciales, cuando se ubican por encima de los 3,500 msnm (Figura 12). Sin embargo, existen cimas a altitudes intermedias formadas por coladas lávicas más fluidas que formaron pequeñas mesas, donde se presentan procesos de erosión hídrica superficial por deforestación y cambio de uso del suelo.



Figura 12. Rocas andesíticas «lajeadas» por influencia periglacial en la superficie cumbreal del Tancítaro.

La vegetación dominante es *Pinus hartwegii*-y *Festuca toluensis*.

Otra característica importante de esta unidad geomórfica es la configuración radial de sus laderas, que genera a su vez diferentes grados de orientación de las mismas, determinando así el establecimiento de distintas comunidades vegetales debido a condiciones también variables de humedad, exposición al sol y a formas específicas de las laderas (convexas, cóncavas y rectilíneas).

Igual que con las cimas, los procesos varían según la altitud ya que por encima de los 3,000 msnm predominan los procesos periglaciales, de intemperismo físico y los procesos gravitacionales, mientras que a altitudes intermedias y bajas son más importantes los procesos de tipo hídrico, movimientos en masa y los procesos erosivos, estos últimos más relacionados con actividades agropecuarias (pérdida superficial del suelo, erosión de pie de vaca, etc.).

Por otro lado, existen dos tipos principales de valles cuyo origen está ligado con la presencia o ausencia de actividad glaciár y periglaciár ocurrida en el pasado. Así, se encuentran valles de tipo erosivo, cuyos cauces se presentan en forma de “V” y sus procesos son debidos principalmente a la actividad hídrica superficial combinada con el desarrollo de escalones por la compactación del suelo (Figura 13)

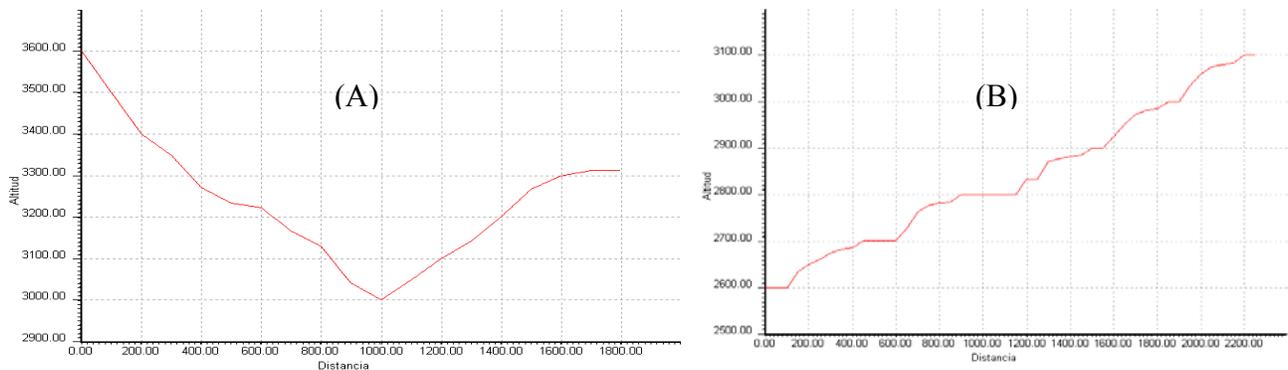
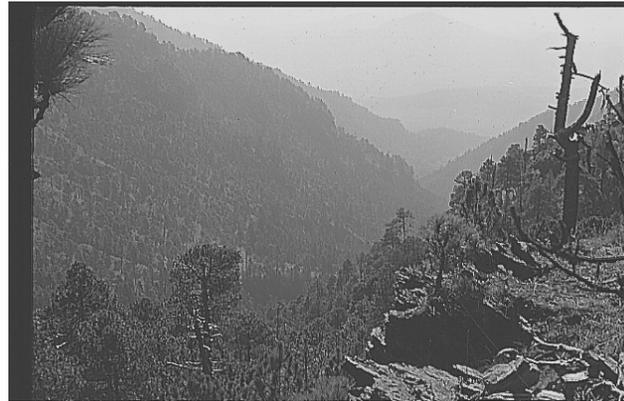


Figura 13. Valle en “V”. El bosque abierto es de *Pinus hartwegii* con pastos montaños. Los perfiles transversales (A) y longitudinal (B) permiten apreciar mejor la configuración del relieve.

El otro tipo de valle es el de origen glaciár y cuyo perfil transversales en forma de “U” (Figura 14), lo que se denota por la presencia de circos de erosión, escarpes, escalonamientos y formas cóncavas correspondientes a ambientes periglaciales actuales y a formas derivadas de glaciares que actuaron hace unos 30,000 años (Vázquez Selem, comunicación personal).

Un cuarto elemento de importancia son las laderas externas cuya inclinación tiende a ser menor (15° a 25°) que las de los valles erosivos por dinámica fluvial predominante ($>25^\circ$). Sin embargo, la diferencia fundamental es la exposición al sol, el predominio de laderas rectas y los procesos de erosión laminar (Figura 15).

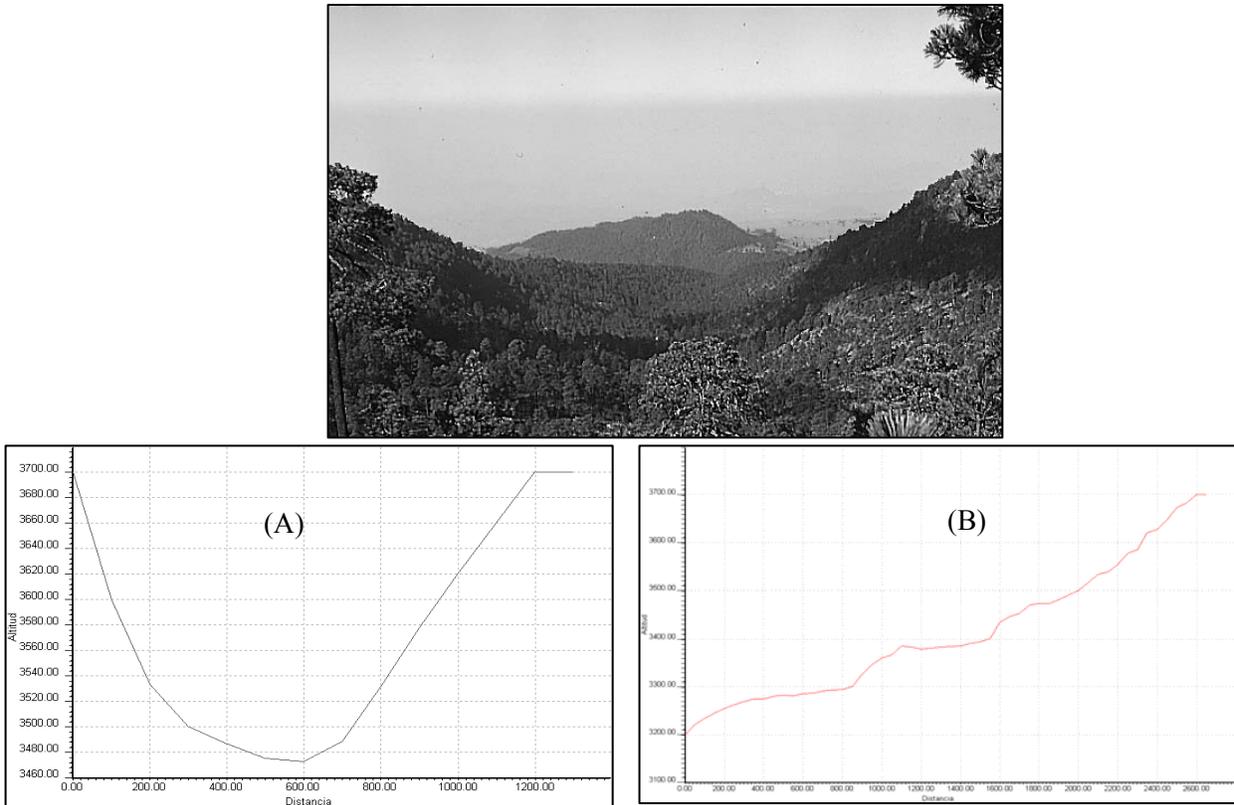


Figura 14. Valle en “U”. Las laderas son pronunciadas con frecuentes escarpes y forma tendiente a la concavidad afectadas por procesos periglaciares.

En el fondo del valle se observan bosques cerrados de *Abies*, de *Pinus* y bosques mixtos de *Alnus-Pinus*. Los perfiles transversales (A) y longitudinal (B) permiten apreciar mejor la configuración del valle.

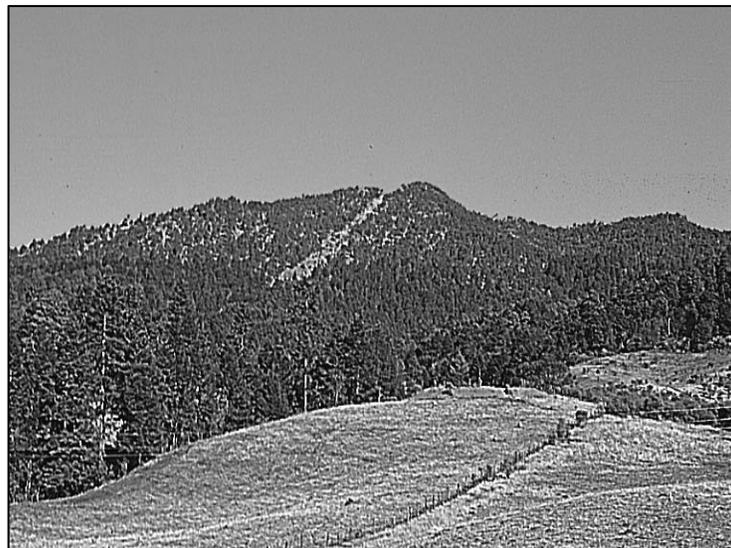


Figura 15. Vista de una ladera externa del Tancítaro.

Se aprecia en lo alto, vegetación de bosque abierto y ladera abajo bosque cerrado y en primer plano, cultivos de maíz.

Estructuras volcánicas monogenéticas

Estas estructuras están constituidas tanto por conos volcánicos de escoria y cenizas, siendo estas últimas las más frecuentes, como por domos lávicos. La pendiente que presentan siempre es mayor a 20° de inclinación y existen muchas otras estructuras con pendientes muy superiores debido probablemente a su juventud y origen. Algunas de éstas estructuras han desarrollado valles originando barrancos dispuestos radialmente desde el centro del cono y acentuados por la deforestación y el cambio de uso del suelo. Debido a su distribución espacial, estas estructuras son importantes porque marcan el rompimiento del paisaje al conformar un rosario de elevaciones que rodean el estratovolcán. Las estructuras mencionadas exhiben diferentes tipos de cimas: agudas, convexas o redondeadas y crestas de cráter (Figura 16).



Figura 16. Estructura volcánica monogenética típica.

Se caracteriza por su pronunciada pendiente y por la presencia de bosques cerrados tanto de coníferas como mixtos. En primer plano, cultivos de subsistencia.

Estos edificios volcánicos se distribuyen por debajo de los 3,000 msnm y se vuelven conspicuos hacia los 2,500 msnm, especialmente en el extremo oriental del parque nacional, donde su complejidad es mayor debido a que estas formas se mezclan con otras unidades mayores como los derrames lávicos, el piedemonte del Tancitaro y las planicies interlávicas.

Derrames lávicos

Están formados por dos subunidades principales: los que forman mesas de lava y aquellos que se manifiestan como laderas de derrames lávicos. Las mesas lávicas son menos abundantes y más jóvenes, mientras que las laderas de derrames lávicos de derrames lávicos generalmente son más antiguas y

mucho más abundantes. Las mesas lávicas evidencian procesos edafogénicos más marcados y los derrames lávicos, especialmente los que se encuentran al sureste del Tancitaro (en la formación Zumpimito), presentan procesos de morfogénesis predominantes. En el caso de las mesas por coladas lávicas, las laderas por lo general son muy inclinadas y en ocasiones hasta abruptas (más de 30° de pendiente), con superficies cumbrales amplias y de escasa pendiente (menos de 8° de inclinación). Estas unidades son importantes porque algunos elementos son muy recientes dando como resultado zonas de captación de agua (áreas de malpaís). Las laderas de derrames lávicos poseen pendientes mucho más bajas en lo general, e incluso forman lavas escalonadas donde se practica la agricultura de temporal y permanente. En las zonas más antiguas, como ya se mencionó se observan barrancos bien desarrollados e incluso profundos (Figura 17).

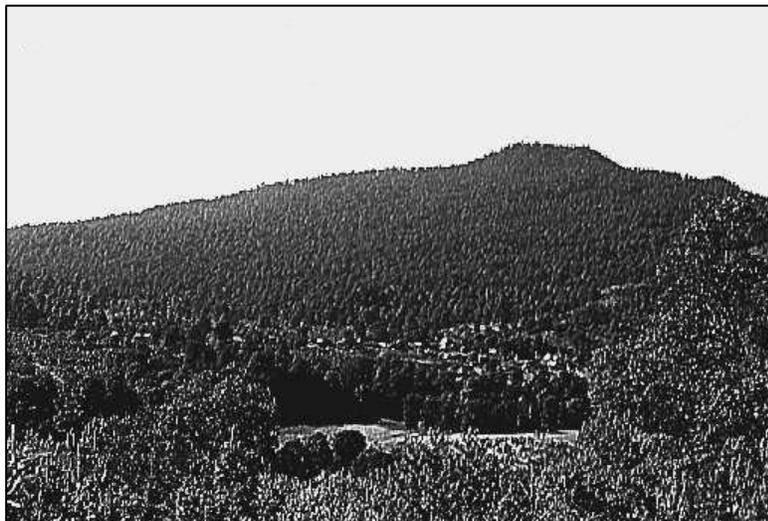


Figura 17. Laderas de derrames lávicos en torno al Cerro Prieto.

Piedemonte

Por su tamaño e importancia en la manifestación de procesos morfoedafogénicos, el piedemonte del Tancitaro es considerado como una unidad de relieve principal. Esta unidad se compone de dos subunidades de laderas denominadas piedemonte superior e inferior, discriminadas en función de la pendiente (mayor en el piedemonte superior) y la expresión morfológica (Figura 18).

El piedemonte superior se distingue por tener una mayor inclinación ya que puede alcanzar los 15° de pendiente y por la existencia de barrancos bien desarrollados donde es posible apreciar las capas que lo formaron. Las paredes de estos barrancos suelen presentar inestabilidad, en especial donde la cobertura original ha desaparecido. El piedemonte inferior corresponde claramente a procesos de acumulación

aluvial y es un ambiente principalmente de deposición que se encuentra interrumpido en la ladera oriental del Tancitaro por la aparición de estructuras volcánicas posteriores a su formación. Lo anterior es importante ya que marca una serie de anomalías en la normalidad geomorfológica del paisaje, que se reflejan en los ritmos de erosión, el establecimiento de la vegetación y en el balance hídrico.



Figura 18. Piedemonte con cultivos anuales y bosque de Abies muy perturbado.

Planicies

Se detectaron tres tipos de planicies en la zona de estudio: interlávica, aluvial y aluvial interlávica. Estas unidades acumulativas presentan en algunas zonas (al noroeste y al norte) evidencias claras de erosión, especialmente en el caso de aquellas planicies formadas por cenizas, ya que el material que las forma es tan débil que resulta muy susceptible a la erosión hídrica y eólica. Por otra parte, la pendiente (menos de 8° de inclinación) favorece el establecimiento de la mayor parte de los cultivos agrícolas, lo que puede ocasionar el agotamiento de algunos suelos al ser expuestos a la erosión. Este tipo de fenómenos ya se observa por ejemplo en terrenos agrícolas cercanos a la población de Angahuan.

La observación de estos procesos físicos del paisaje deja entrever diferencias que se reflejan no sólo en el desarrollo de los procesos ecológicos, sino también en el de los procesos sociales de apropiación del medio y en el manejo mismo del recurso natural.

Entre las principales variaciones ecológicas están aquéllas que tienen que ver con el establecimiento de comunidades vegetales adaptadas a condiciones específicamente montañosas, con pendientes abruptas y condiciones climáticas extremas. Un buen ejemplo son los bosques de *Abies* y los de *Pinus hartwegii*,

así como el establecimiento de pastos submontanos, ejemplos todos de las zonas altas del Tancítaro, mientras que en las partes bajas predominan comunidades vegetales de bosques mixtos. En relación con los procesos sociales, es evidente la diferencia entre las zonas altas y las bajas. En las primeras predominan las actividades forestales y en las segundas las agrícolas, apareciendo en éstas también grandes asentamientos humanos debido a condiciones de pendiente y al desarrollo de suelos profundos. La descripción de unidades del relieve puede, entonces, permitirnos comprender la dinámica del paisaje y la relación que guarda dicha dinámica con componentes complejos del mismo paisaje, como el antrópico. El conocimiento del medio físico se vuelve, de esta forma, esencial para el desarrollo de comunidades y pueblos que desean llevar a cabo un buen manejo de sus recursos.

El medio biótico

La fauna y flora del Tancítaro posee particularidades extraordinarias dadas las características geomorfológicas y climáticas que condicionan y determinan su abundancia y diversidad. Los listados con que se cuenta indican un número abundante de especies animales y vegetales que ha motivado la declaración del Tancítaro como zona prioritaria terrestre y como zona de importancia para las aves por parte de CONABIO (Arriaga, 2000; Benítez *et al.*, 1999).

Se tienen registros de al menos 370 especies de vegetales (García-Ruiz *et al.*, 1998; García-Ruiz, Coms. Pers.), 38 de anfibios y reptiles (Villaseñor, 2005), 253 de aves (Benítez *et al.*, 1999) y 90 de mamíferos (Villaseñor, 2005). Los listados pueden consultarse en el documento elaborado por Fuentes y Alvarado (2006) para CONAFOR. García-Ruiz *et al.* (1998), apuntan una especie endémica en la flora del Tancítaro y que es además un registro nuevo.

De acuerdo con Fuentes y Alvarado (2006), 63 especies de la flora y fauna del Tancítaro se encuentran en alguna de las categorías de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001 (Figura 19). De ellas, el 66.7% (42 especies) se encuentran bajo protección; el 27% (17 especies) se encuentran amenazadas y el 6.3% (4 especies) se encuentran en peligro de extinción.

Por otro lado, el Tancítaro tiene una gran importancia biológica debido a la existencia de especies animales endémicas que suman en total 76 especies con esta categoría. De estos datos, sorprende el que corresponde a anfibios y reptiles con 27 especies, correspondiendo casi a las tres cuartas partes del total de registros para estos grupos de animales (Figura 20). En el caso de las aves el endemismo alcanza el

10% de los registros y los mamíferos tienen un importante 25% del total.

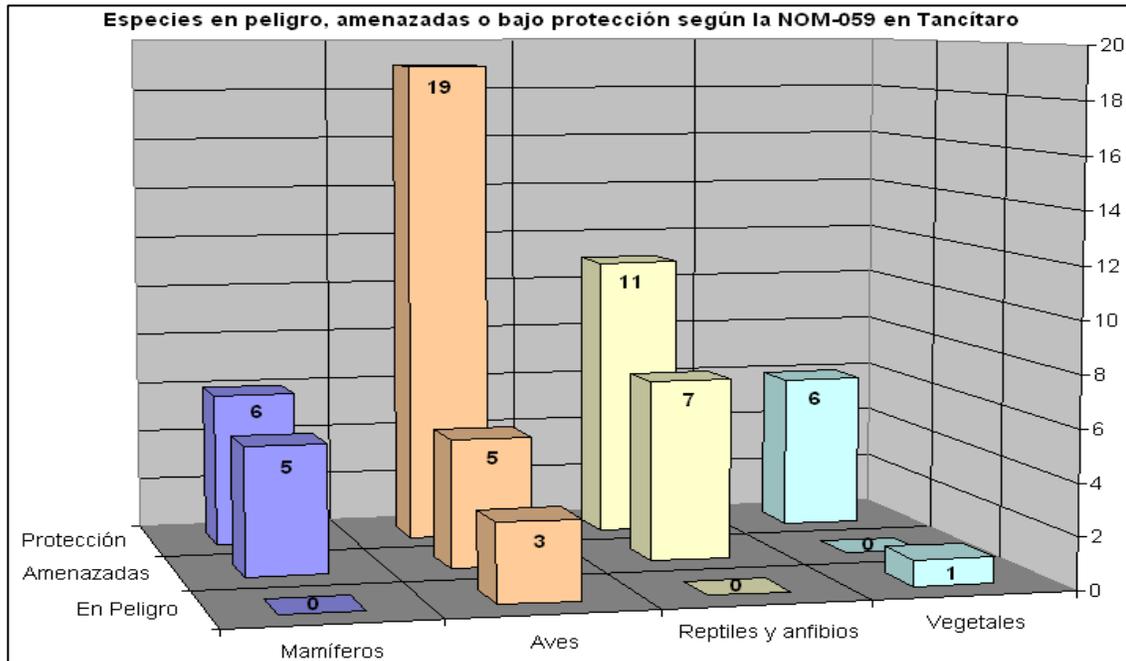


Figura 19. Especies de flora y fauna del Tancítaro bajo alguna categoría de la Norma Oficial Mexicana 059-ECOL-2001.

Fuente: Fuentes y Alvarado (2006).

Considerando lo anterior, es claro que el Pico de Tancítaro posee una situación extraordinaria en el ámbito biológico que se aparea con su importancia social, hidrológica y física.

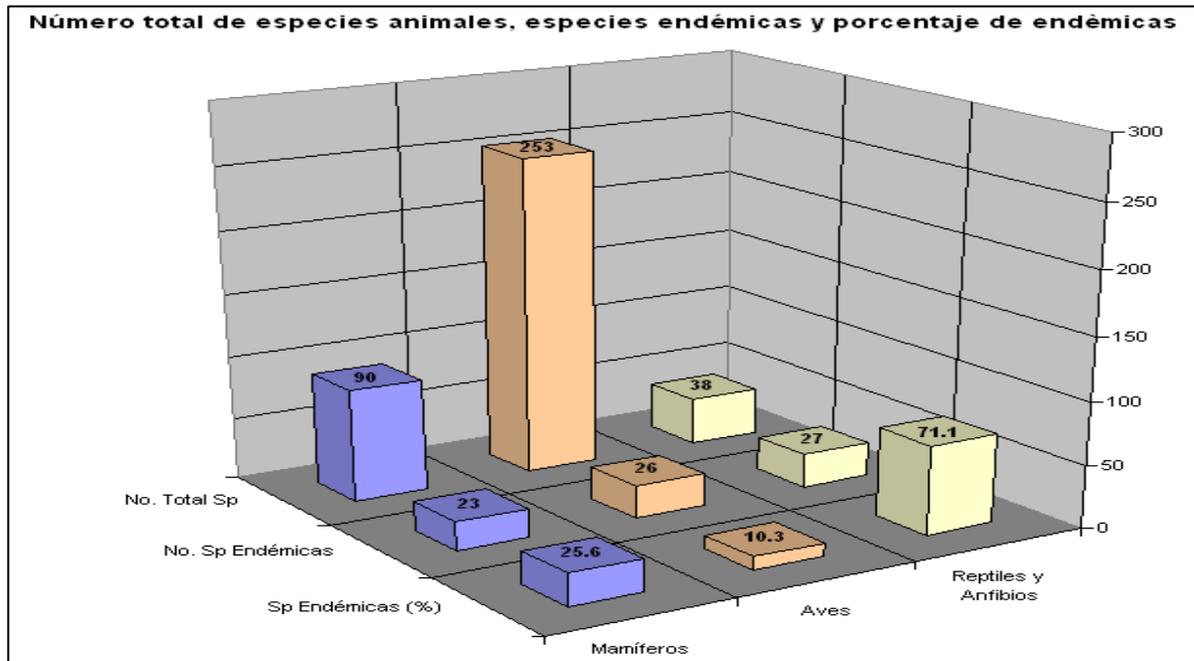


Figura 20. Especies de animales, número de endemismos por grupo y porcentaje del total.

Fuente: Fuentes y Alvarado (2006).

El entorno social del Tancítaro

Al hablar del Pico de Tancítaro desde su perspectiva social debemos referirnos a este espacio del territorio como una microregión con características muy particulares que le hacen diferente de las microregiones aledañas: la Meseta Purépecha y la tierra caliente. Quizá el contacto entre estas dos microregiones hace de la del Tancítaro una zona social de “transición”, es decir de encuentro entre lo indígena y lo mestizo, situación que se refleja en la existencia de festividades y costumbres de gran sincretismo.

Es evidente por tanto, la confluencia de comunidades indígenas (algunas conservando sus tradiciones como Angahuan y otras con la pérdida evidente de ellas como en el caso de San Juan Nuevo Parangaricutiro) con grupos de mestizos organizados tanto en formas de propiedad social (ejidos y comunal), como en formas de propiedad privada (pequeña propiedad).

El área de estudio del Tancítaro posee 116 localidades entre rancherías, comunidades y ciudades pequeñas que en conjunto suman 36,219 habitantes de acuerdo con el Censo del 2005 (INEGI, 2006).

Una de las características sociales más evidentes es la vocación agrícola comercial del aguacate y el

uso forestal maderable y no maderable que se hace de los bosques, con la permanente sustitución de las superficies dedicadas al cultivo de maíz y al pastoreo en un proceso inexorable de cambio de uso del suelo (Fuentes, 2000; Ramírez, 2009).

El funcionamiento socio-ambiental

El funcionamiento del entramado socio-ambiental está vinculado directamente con la tenencia de la tierra y sus formas de apropiación del paisaje. En el caso del Tancítaro la propiedad de la tierra presenta las tres variantes posibles: propiedad comunal, propiedad ejidal y pequeña propiedad privada. Se puede decir que la propiedad comunal se localiza sobre todo en la parte norte, oriental y suroriental del Tancítaro; mientras que la propiedad ejidal se distribuye en general hacia el oeste de la montaña, y los pequeños propietarios hacia el sur, el oeste y noroeste del Tancítaro.

Dentro del Parque Nacional Pico de Tancítaro, existe el trabajo desarrollado por Garibay y Bocco (1999), para explicar las relaciones entre la propiedad de la tierra, el uso de los recursos y la organización social en el marco de la legislación ambiental. Estos autores desarrollaron un extenso análisis definiendo sitios sociales dentro del parque nacional y evaluando el grado de oportunidad que tienen dichos sitios, para manejar sus recursos en función de la complejidad que representan sus formas de organización social para la toma de decisiones.

Los sitios sociales del Tancítaro comprenden once entidades socio-ambientales a saber (Figura 21):

1. Comunidad indígena de Caltzonzin (La Escondida)
2. Comunidad indígena de San Juan Nuevo
3. Comunidad indígena de Santa Ana Zirosto
4. Ejido de Apo
5. Ejido la Majada
6. Pequeños propietarios de La Peñita
7. Pequeños propietarios de La Soledad
8. Propietarios de Parástaco
9. Propietarios de Paso la Nieve
10. Propietarios del Jazmín
11. Área Zirimóndiro

Para cada sitio social se expresa un tipo de tenencia de la tierra que se refleja en las formas de organización social (asambleas ejidales y comunales, asociaciones de productores). De esta forma, coexisten en el Tancítaro los tres tipos de propiedad protegidos por nuestra Carta Magna, la propiedad comunal, la propiedad ejidal y la propiedad privada. Del total de sitios sociales, tres son de propiedad

comunal, dos de tipo ejidal y los seis restantes de propiedad privada en pequeña escala (desde 5 ha de aguacate y/o maíz y/o pastos).

Un aspecto importante es el hecho de saber cual es la fortaleza que tiene cada sitio social para el manejo de sus recursos, ya que esta fortaleza tiene que ver con su forma de organización social, su tipo de propiedad y la madurez social que ha alcanzado cada grupo para establecer sus propias prioridades de manejo así como sus propias políticas de aprovechamiento de los recursos naturales.

Tomando como base la información y la propia evaluación hecha por Garibay y Bocco (1999), se elaboró el mapa de evaluación de sitios sociales, para tener un elemento de diagnóstico del manejo, y aunque está restringido al parque nacional es posible extrapolar el análisis al total del área de estudio. (Figura 22).

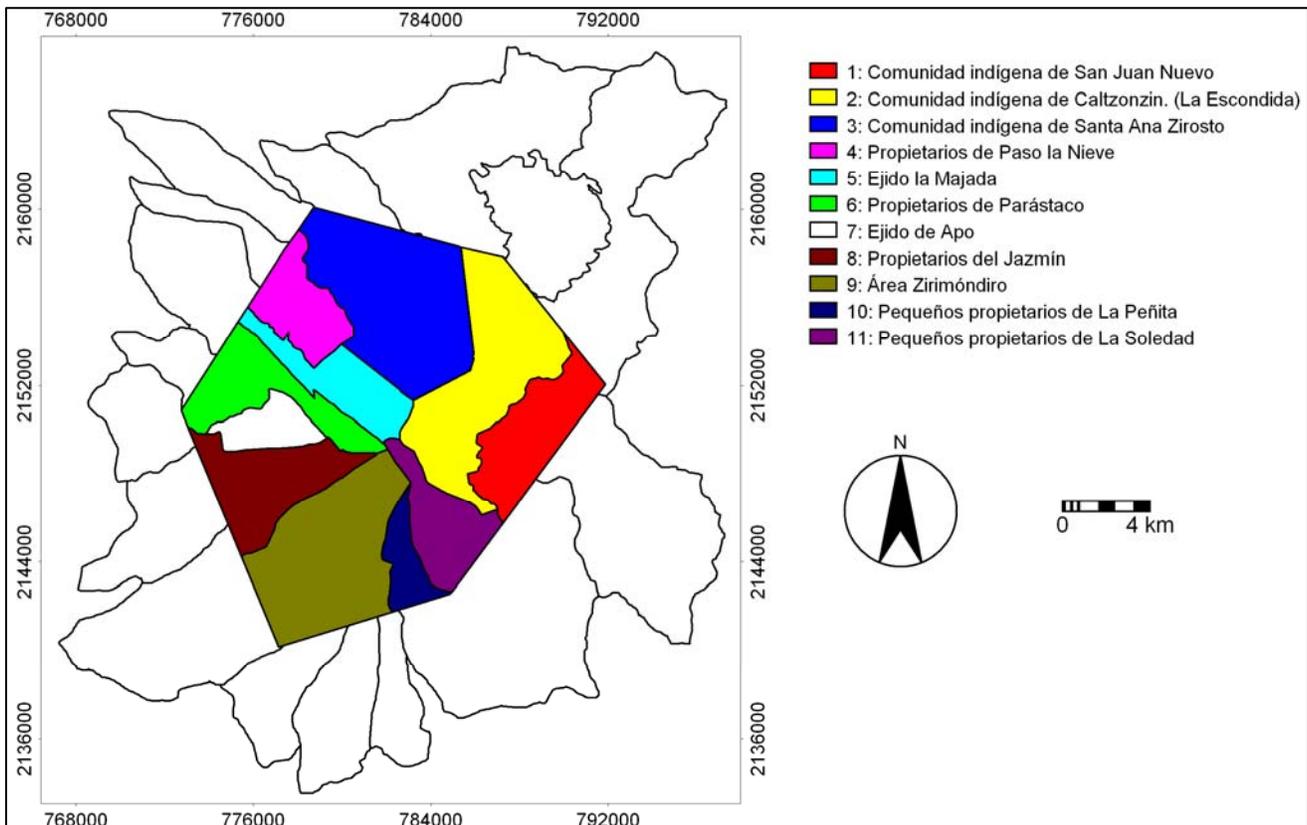


Figura 21. Mapa de sitios sociales y tenencia de la tierra en el parque nacional Pico de Tancitaro.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Garibay y Bocco (1999).

En la Figura 22 se puede apreciar en primera instancia que existe solo un sitio social con la fortaleza institucional fuerte para acceder al recurso. Dicho sitio social es la Comunidad Indígena de Nuevo San

Juan Parangaricutiro. Enseguida, con una fortaleza regular, le siguen el Ejido de Apo y la Comunidad Indígena de Santa Ana Zirosto; posteriormente, sigue el Ejido La Majada con fortaleza débil a regular; enseguida, con fortaleza institucional débil están la Comunidad Indígena de Caltzontzin y el Área Zirimóndiro de pequeños propietarios; después de estos, con fortaleza muy débil a débil, se encuentran los pequeños propietarios de Paso la Nieve, los del Jazmín y los de la Soledad; y por último, los pequeños propietarios de Parástaco, se presentan con una fortaleza institucional de acceso al recurso muy débil.

Vale la pena detenerse un poco en lo anterior, ya que como se observa, el único sitio social fuerte, es la Comunidad Indígena de San Juan Nuevo Parangaricutiro. Por otro lado, los sitios sociales con fortaleza regular lo conforman un ejido y de nuevo una comunidad indígena. En cuanto a la fortaleza institucional para el acceso al recurso, los últimos sitios lo ocupan las propiedades privadas.

Lo que podemos deducir de esta evaluación cualitativa es que cuando se tiene una organización social aglutinante, existe mayor oportunidad de acceso al recurso y por tanto del manejo, que permite una mejor toma de decisión para el grupo en su conjunto lo que redundaría por supuesto, en un mejor manejo del recurso.

De la misma forma, se ha observado que los territorios donde la propiedad es comunal o ejidal, la gente tiende a aprovechar de manera más diversa sus recursos aglutinando diversas actividades en un mismo espacio, por ejemplo, una parcela comunal puede llegar a tener al mismo tiempo producción de maíz, ganado, recolección de hierbas y utilización de árboles para leña, mientras que en general, los propietarios privados especialmente aquellos que cuentan con cultivos comerciales solo hacen un uso restringido de sus recursos.

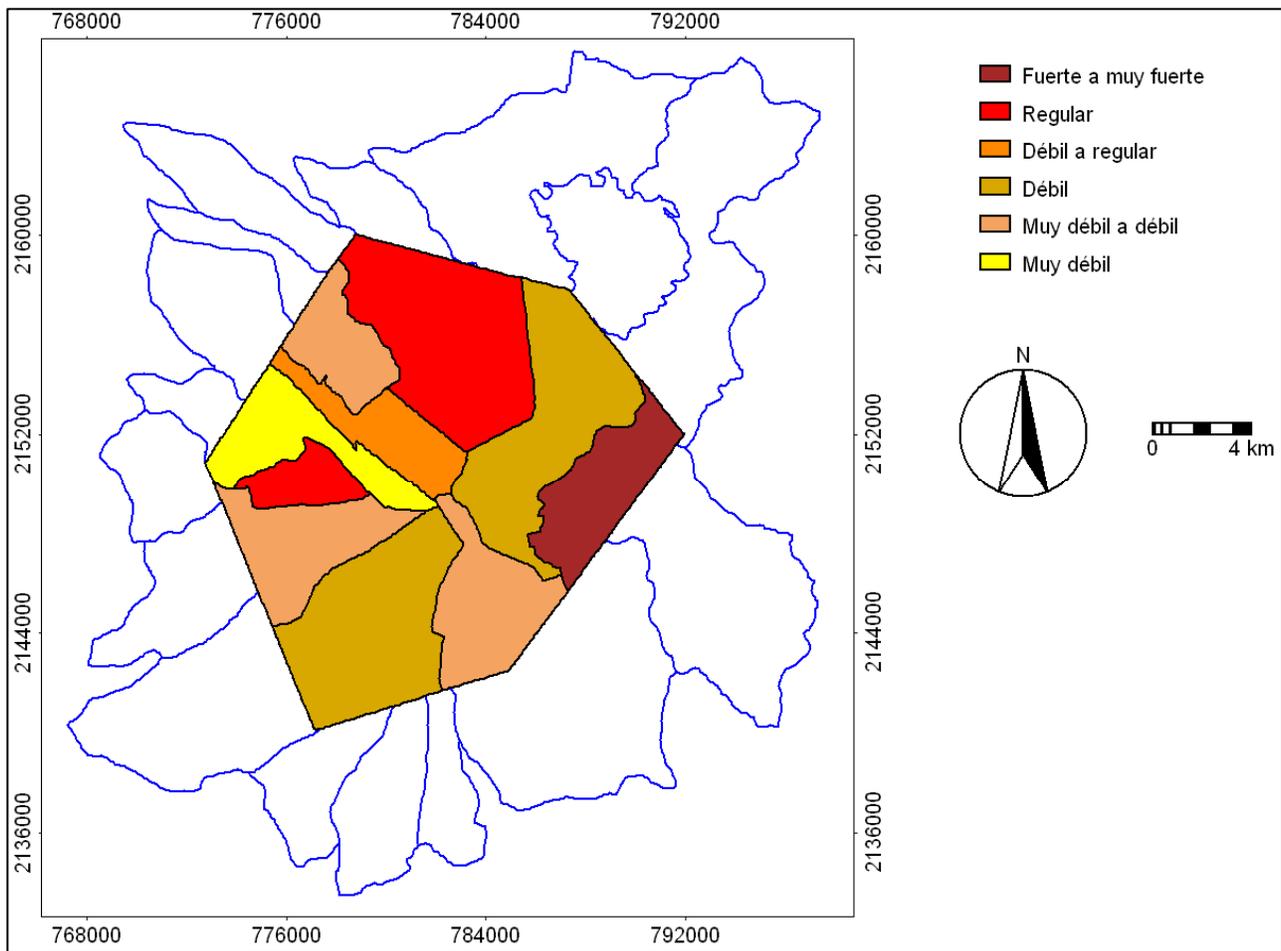


Figura 22. Evaluación de las fortalezas institucionales de los sitios sociales para el manejo de recursos naturales

Fuente: Elaboración propia con datos de Bocco y Garibay, 2000.

Fuentes y Alvarado (2006), en el estudio de ordenamiento del municipio de Cotija de la Paz, documentaron mediante la aplicación de encuestas a los habitantes del campo, situaciones similares. En este caso, los ejidos de Cotija exhibieron en general un mejor y más diverso manejo de recursos que los propietarios privados lo que podría estar indicando que cuando la propiedad social es la que rige el manejo del recurso, éste tiene mejores oportunidades debido a la necesidad de consensos para el acceso al recurso.

Normalmente, la organización jerárquica para la toma de decisiones en el uso del agua tiene un esquema parecido al que se presenta en la figura 23 donde se observa que el usuario para tomar decisiones al respecto, debe considerar a la asamblea si es propiedad comunal o ejidal; o al municipio si es de propiedad privada. Sin embargo, el uso del agua y la toma de decisiones suele ser mucho más compleja.

A partir de este breve análisis, se ha construido un modelo sobre el manejo del agua en función de la organización social que rige a los distintos grupos usuarios del recurso agua.

Cuando se habla de un aprovechamiento individual privado, el manejo del agua se traduce en un esquema donde el usuario verifica la presencia del recurso, avisa a las autoridades y se efectúa el aprovechamiento referido. Lo anterior, si la fuente de agua se localiza dentro de la propiedad privada.

En cambio, cuando el usuario pertenece a una comunidad indígena, el uso del agua se ve reglamentado por los usos y costumbres, por lo que se hace necesario plantear en la asamblea comunal el aprovechamiento, cuando éste va mas allá del uso normal y consuetudinario. De forma semejante, el uso del agua en un ejido, pasa por las decisiones de la asamblea ejidal cuando el uso por el demandante afecta a otros usuarios o a la comunidad ejidal.

Sin embargo, en los tres casos, cuando el agua es utilizada para el consumo humano, generalmente se tienen variantes que modifican la toma de decisiones. Si el agua es de noria, el usuario toma la decisión y lleva a cabo su aprovechamiento. En el caso de fuentes de agua para más de un usuario, las decisiones suelen ser tomadas en asambleas o juntas vecinales y con el aval de las autoridades. Y finalmente, cuando la fuente de agua es para el abasto urbano municipal, las decisiones se trasladan a formas más institucionalizadas donde operan órganos de gobierno municipal.

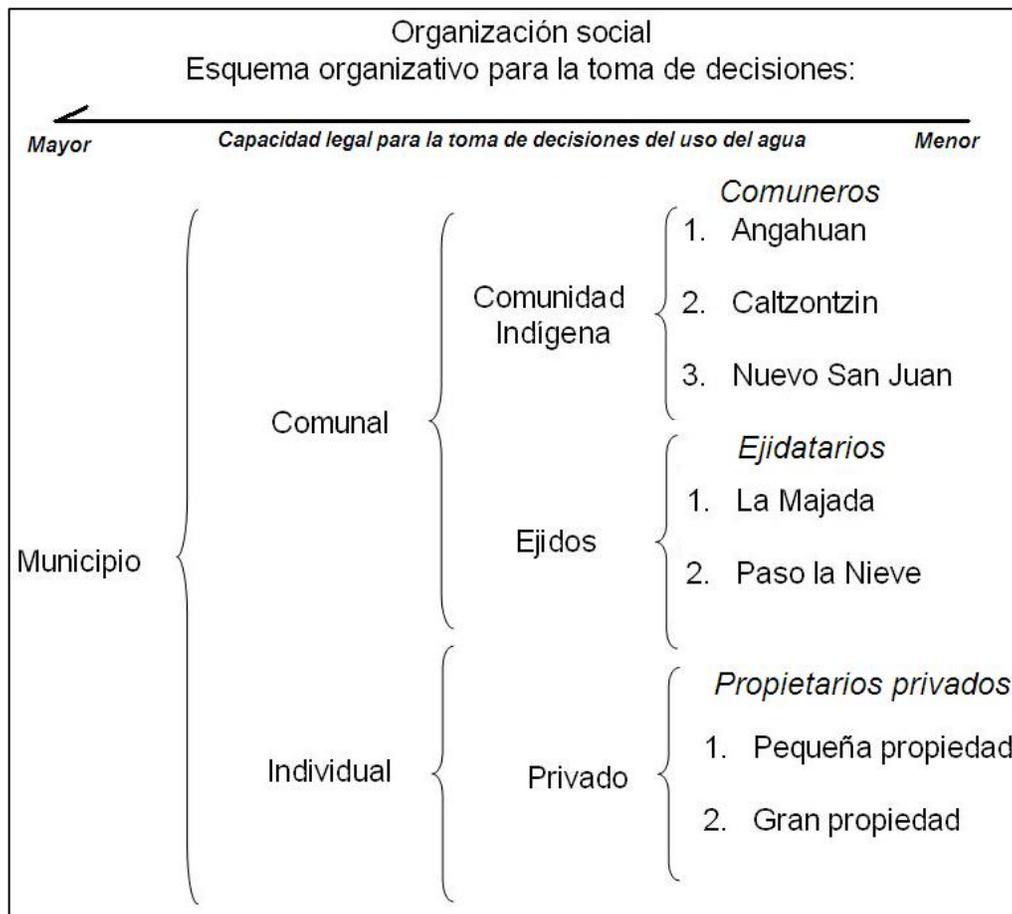


Figura 23. Esquema de la organización social para la toma de decisiones.

Una forma de manejo del agua que es diferente, es la que corresponde al uso de agua para riego, en donde la fuente de agua es controlada por una dependencia federal, en este caso la Comisión Nacional del Agua o CONAGUA. En esta situación, la CONAGUA es la que decide la factibilidad de otorgar los permisos correspondientes a solicitud del interesado. Esta forma de manejo del agua no es la más frecuente en el Tancitaro.

En todos los casos hay una serie de entramados a veces no formales que nos indican especialmente en el caso de los ejidos y comunidades, la existencia de patrones de organización participativos que subyacen a la organización formal y que tienen un importante reflejo en el aprovechamiento del agua y que pueden ser aprovechados para el manejo más sustentable del recurso a partir de esquemas de planeación participativa que pudieran agregarse a esquemas formales de planeación actualmente en curso como son los ordenamientos ecológicos municipales.

Finalmente, para que se cumpla lo anterior, es menester partir de la idea básica de que las poblaciones en el Tancítaro constituyen grupos sociales que detentan la propiedad (sea comunal o privada) organizada y muchas veces participativa del recurso hídrico. De estas reflexiones surgen preguntas generales que deberán resolverse en lo futuro ¿qué tanto la crisis ambiental del agua puede ser resuelta a partir de la apropiación efectiva, responsable –sustentable- y participativa de las comunidades y ejidos?; ¿cuál es el papel que debe tener la autoridad en términos formales e informales para hacer efectiva dicha apropiación?; ¿de qué forma se puede articular la propiedad privada mexicana en un esquema de apropiación sustentable y co-participativa en conjunto con la propiedad ejidal y comunal sin entrar en conflicto por el recurso del siglo?

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Morfometría de cuencas

De acuerdo con Jardí (1985), la morfometría de cuencas constituye una herramienta fundamental en el análisis espacial de las cuencas de drenaje, siendo importante en la generación de datos de aforo o en la aportación de agua en un período determinado o bien para conocer la cantidad de agua precipitada en la cuenca durante un lapso de tiempo en concreto, conociendo la pluviometría del área.

La morfometría puede ser relacionada con el balance hídrico, es decir, relacionar la forma de una cuenca con aspectos de oferta y demanda de agua con el objeto de mejorar el análisis hidrogeográfico y ayudar en el planteamiento de escenarios propuesto en el trabajo.

La morfometría incluyó el análisis de ocho parámetros morfométricos: índice de elongación, coeficiente de forma, coeficiente de compacidad, densidad de drenaje, altura media, coeficiente de masividad, curva hipsométrica, red de drenaje, y área de la cuenca. Todos ellos obtenidos mediante el SIG ILWIS v.3.3 (Figura 24). A continuación se explican cada uno de dichos parámetros así como su significado en este estudio.

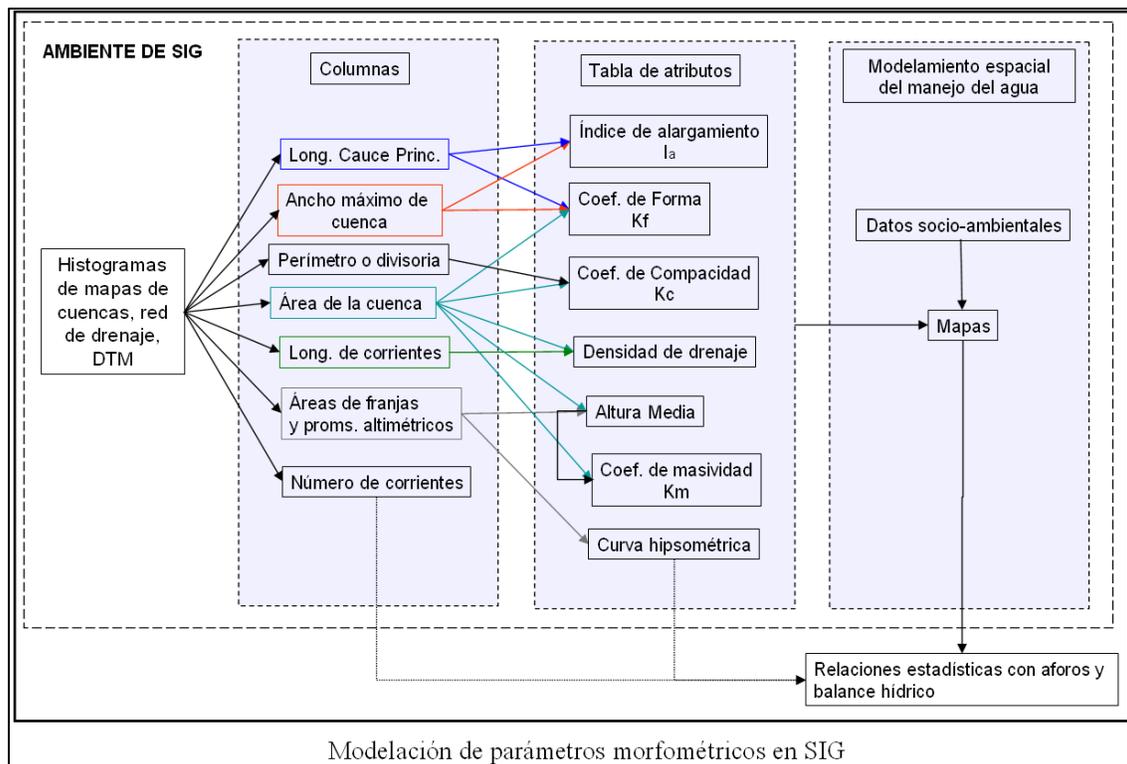


Figura 24. Obtención de parámetros morfométricos en SIG.

Índice de alargamiento o elongación (I_a)

Este índice propuesto por Horton, relaciona la longitud máxima encontrada en la cuenca, medida en el sentido del río principal, y el ancho máximo de ella, medido perpendicularmente; es decir que muestra el comportamiento de la cuenca de acuerdo a su tendencia a ser de forma alargada; se calcula de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$I_a = \frac{L_m}{l}$$

Donde:

- I_a : Índice de alargamiento
 L_m : Longitud máxima de la cuenca
 l : Ancho máximo de la cuenca

Cuando I_a toma valores mayores a la unidad, nos indica que se trata de una cuenca alargada, mientras que para valores cercanos a 1, se trata de una cuenca cuya red de drenaje presenta la forma de abanico y puede tenerse un río principal corto. En razón de lo anterior, el índice permite conocer la dinámica del agua en el drenaje de la cuenca –rápida o lenta- y su dinámica de potencial erosivo y arrastre.

Coefficiente de forma (K_f)

Este índice, propuesto por Magette en 1976 (Jardi, 1985), relaciona el ancho promedio del área de captación con respecto a la longitud de la cuenca, medida desde el punto más alejado de ella hasta la salida.

El factor de forma, está dado por:

$$K_f = \bar{L} / L$$

Donde:

- \bar{L} : Ancho promedio del área de captación
 L : Longitud de la cuenca

El ancho promedio \bar{L} , se estima como:

$$\bar{L} = A / L$$

Donde:

- A: Área de captación

Luego:

$$K_f = \frac{\bar{L}}{L} = \frac{A/L}{L}$$

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Este factor relaciona la forma de la cuenca con la de un cuadrado, correspondiendo un $K_f = 1$ para regiones con esta forma, que es imaginaria. Un valor de K_f superior a la unidad nos proporciona el grado de achatamiento de ella o de un río principal corto y consecuentemente con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas. En términos del balance hídrico puede combinarse con información de la cobertura para estimar el grado de escurrimiento o infiltración de la cuenca (si favorece a uno u otro).

Coeficiente de compacidad (K_c)

El coeficiente de compacidad, igualmente propuesto por Gravelius, compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia, cuyo círculo inscrito tiene la misma área de la cuenca en estudio. K_c se define como la razón entre el perímetro de la cuenca que es la misma longitud del parteaguas que la encierra y el perímetro de la circunferencia.

La ecuación que nos permite el cálculo de este coeficiente corresponde a:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

- K_c : Coeficiente de compacidad
- P: Perímetro de la cuenca (longitud de la línea de parteaguas)
- A: Área de la cuenca

Este valor adimensional, independiente del área estudiada tiene por definición un valor de 1 para cuencas imaginarias de forma exactamente circular. Los valores de K_c nunca serán inferiores a 1. El grado de aproximación de este índice a la unidad indicará la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuanto más cercano sea a la unidad, lo cual quiere decir que entre más redonda sea una cuenca, mayor será la concentración de agua.

Se han establecido tres categorías para la clasificación según el valor de este parámetro y que se pueden apreciar en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Valores de Compacidad de cuencas.

Valores de K_c	Forma
1.0 – 1.25	Redonda a oval redonda
1.25 – 1.50	De oval redonda a oval oblonga
1.50 – 1.75	De oval oblonga a rectangular oblonga

Densidad de drenaje

Este índice permite tener un conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. Asimismo, valores bajos indicarán su relación con rocas masivas y materiales permeables con alta infiltración (Gil, et.al., 2009)

La densidad de drenaje se calcula dividiendo la longitud total de las corrientes de la cuenca por el área total que las contiene, o sea:

$$D_d = \frac{L}{A} \quad \text{Ec.(7)}$$

Siendo:

L: Longitud de las corrientes efímeras, intermitentes y perennes de la cuenca en (Km)

A: Área de la cuenca en (Km²)

La densidad de drenaje varía inversamente con la extensión de la cuenca. Con el fin de catalogar una cuenca bien o mal drenada, analizando su densidad de drenaje, se puede considerar que valores de D_d próximos a 0.5 km/km² o mayores indican la eficiencia de la red de drenaje.

La red de drenaje toma sus características, influenciada por las lluvias y la topografía. Por esto se tiene que para un valor alto de D_d corresponden grandes volúmenes de escurrimiento, al igual que mayores velocidades de desplazamiento de las aguas, lo que producirá ascensos de las corrientes.

En períodos de estiaje se esperan valores más bajos del caudal en cuencas de alta densidad de drenaje y de fuertes pendientes, mientras que en cuencas planas y de alta densidad de drenaje, se espera estabilidad del régimen de caudales, merced al drenaje subsuperficial y al aporte subterráneo.

Altura media

Método Área – elevación

Para poder determinar la elevación media de una cuenca existen diferentes métodos, uno de ellos es la técnica Área–elevación, el cual se describe a continuación:

Para estimar la elevación por este método, es necesario disponer de un plano de curvas de nivel con curvas de nivel con la misma diferencia de nivel a desnivel.

Este método inicia con la medición del área de las diferentes franjas de terreno, delimitada por las curvas de nivel consecutivas y la divisoria de aguas.

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * e_i}{A_t} \quad \text{Ec.(8)}$$

Donde:

E_m : Elevación media de la cuenca en metros

A_i : Área de cada franja en (Km^2 o m^2) de acuerdo al tamaño de la cuenca

e_i : Promedio de las curvas de nivel que delimita cada franja.

A_t : Área total de la cuenca en (Km^2 o m^2)

Coefficiente de masividad (Km)

Este coeficiente representa la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficie.

$$K_m = \frac{\text{Altura media de la cuenca (m)}}{\text{Area de la cuenca (Km}^2\text{)}} \quad \text{Ec.(9)}$$

Este valor toma valores altos en cuencas montañosas y bajos en cuencas llanas

Curva hipsométrica

La variación altitudinal de una cuenca hidrográfica incide directamente sobre su distribución térmica y por lo tanto en la existencia de microclimas y hábitats muy característicos de acuerdo a las condiciones locales reinantes.

Método de la curva hipsométrica

Constituye un criterio de la variación territorial del escurrimiento resultante de una región, el cual, da una base para caracterizar zonas climatológicas y ecológicas de ella.

La curva hipsométrica es la representación gráfica de la variación altitudinal de una cuenca y se obtiene a partir de un plano topográfico, tomándose los valores en porcentaje del área que están por debajo de una determinada altura, que inicialmente será el punto más bajo de la cuenca e irá aumentando de acuerdo a los valores de las cotas de la curva de nivel que encierre las franjas de terreno por ellas definidas y el punto de salida; es decir la elevación correspondiente al 50% del área total.

Para obtener la morfometría, se dividió al Pico de Tancitaro en 16 cuencas obtenidas bajo un criterio geomorfológico, tomando como límite superior (cabeceras) las cimas del Tancitaro y como límite inferior la base pedemontana del estratovolcán. Como criterio complementario se buscó que las cuencas tuvieran tamaños semejantes aunque esto no siempre fue posible.

Bajo el ambiente de SIG, se obtuvieron los distintos parámetros y sus correspondientes medidas; se utilizó para ello, un modelo digital de elevación con tamaño de píxel de 50 x 50 m elaborado mediante la herramienta de interpolación de las curvas de nivel que provee el software. Las curvas de nivel

fueron digitalizadas a su vez, de los mapas topográficos de INEGI a escala 1:50,000 hojas Paracho, Tancítaro, Los Reyes y Uruapan, para después pasar los datos obtenidos a una tabla de Excell para su tratamiento estadístico, que consistió en obtener además de parámetros comunes de tendencia central, correlaciones simples para aquellos parámetros relacionados o que tenían significado entre si.

Los resultados fueron correlacionados con los datos de aforo y de balance hídrico. De acuerdo con lo explicado en el inicio de este apartado, se buscó diferenciar hidrológicamente a las cuencas desde un punto de vista semi-cuantitativo. Las relaciones esperadas fueron aquellas que definían un determinado comportamiento hidrológico en términos de la oferta y demanda de agua. Así por ejemplo, si una cuenca poseía valores bajos de forma, valores altos de compacidad, acompañados de pendientes altas del cauce principal, redes de drenaje complejas y estructuradas y una curva hipsométrica tendiente a relieves predominantemente abruptos, se consideraba que la cuenca tenía una mayor posibilidad de captación de agua y de escurrimiento predominante. Estos datos se compararon con los datos (estimados y medidos) de la oferta de agua (aforos y balance hídrico) para así poder confirmar el comportamiento hidrológico de la cuenca.

Balance hídrico

El balance hídrico constituye uno de los insumos más importantes en el manejo de recursos hídricos y en la evaluación tanto del agua como de los procesos asociados a este recurso. Así, podemos observar estudios dirigidos a estimar el balance hídrico regional (UNESCO-PHI, 2000; IMFIA-MTOP-DNH, 2001); estudios cuyos análisis tienen que ver con la degradación de suelos y modelaciones de lluvia-escurrimiento (Domingo et al., 2001; Fuentes et al., 2002; Abulohom et al., 2001) e investigaciones que utilizan el balance hídrico para el desarrollo de modelos de evapotranspiración.

Por otro lado, existen diversas maneras o modelos para obtener el balance hídrico que pueden ser agrupados en aquellos que *estiman* los valores y aquellos que *miden* dichos valores. La diferencia está dada por la disponibilidad de datos a la hora de efectuar la investigación, es decir, por la calidad y cantidad de insumos para trabajar el balance hídrico.

En este trabajo se utilizó un modelo espacialmente explícito para *estimar* el balance hidrológico superficial de las cuencas del Pico de Tancitaro, a partir de datos de temperatura y precipitación, y de

datos de texturas de suelos, además del uso de un mapa de relieve y el modelo digital del terreno de la zona (Figura 25).

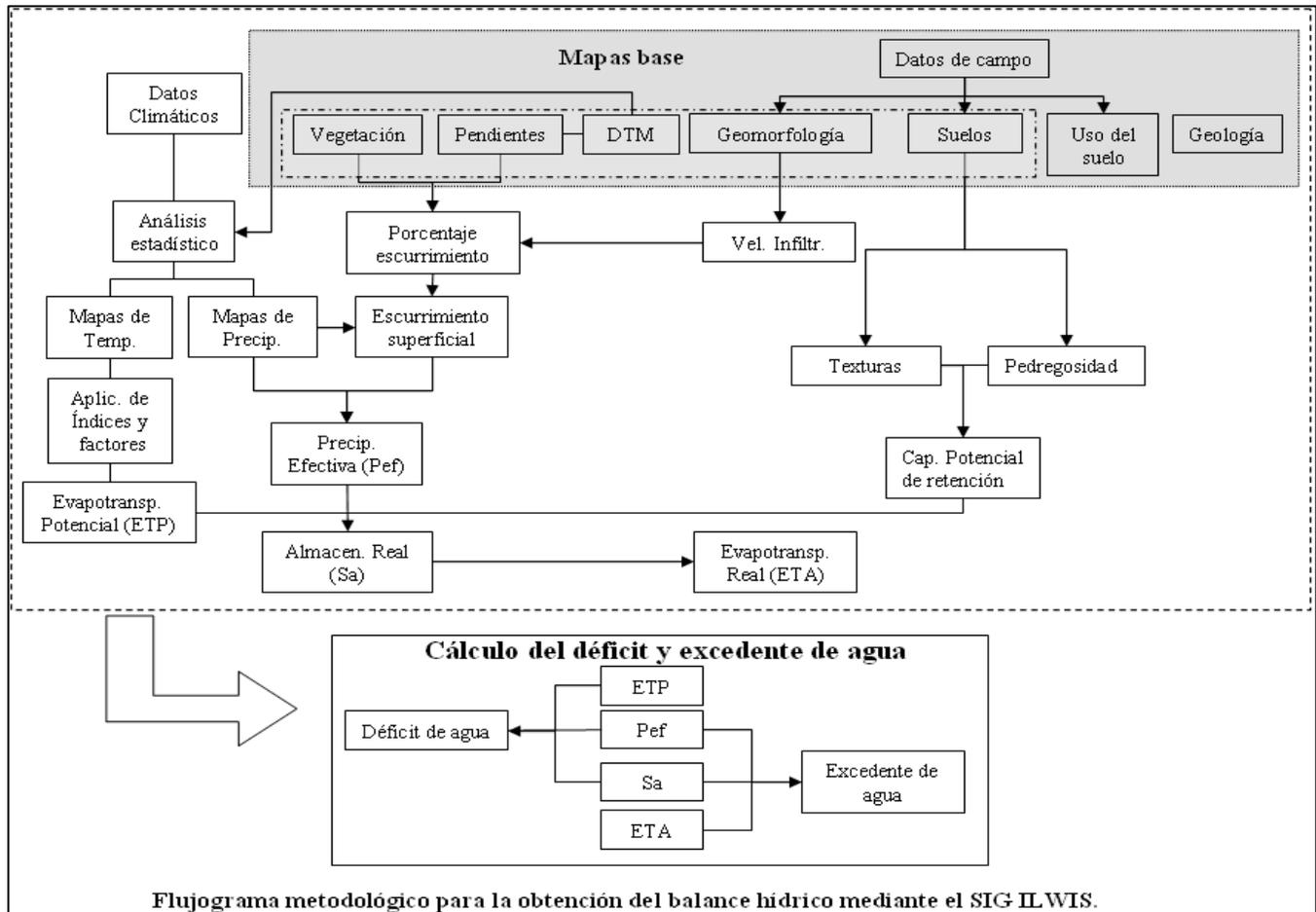


Figura 25. Pasos para obtener dos mapas sintéticos del balance hídrico anual: el de excedente y el de déficit de agua.

El balance se estimó para dos fechas, 1996 y 2003, que son los años de los que se tiene información de la cobertura vegetal y a su vez, insumos para el modelo. Los valores estimados fueron después comparados. Para ello, se llevó a cabo la reclasificación de valores de acuerdo con los valores máximos y mínimos de cada mapa, analizados mediante un histograma.

De acuerdo con ello, se obtuvieron cinco clases de déficit de agua: *muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto*. De la misma manera, se obtuvieron seis clases de excedente de agua: *sin excedente, muy bajo, bajo, moderado, moderadamente alto y alto*. En este caso, se tomaron en cuenta los valores de 0 como otra clase debido a que era una clase muy extendida en varios meses del año.

De esta forma, el Capítulo 5 del presente estudio, se fundamenta en un artículo elaborado por el autor y otros dos colaboradores (Fuentes, et al., 2000) publicado en *Journal of Environment Hydrology*; en el que se estima el balance hídrico superficial y los resultados obtenidos para el Tancitaro, además de presentarse la relación que existe entre el balance hídrico y la degradación potencial de los suelos.

Para obtener el balance hídrico superficial de las cuencas de la zona en estudio, se obtuvieron los siguientes parámetros: (1) el aporte de agua por precipitación; (2) las pérdidas de agua por evapotranspiración; y (3) escurrimiento, cuya diferencia o resta, representa el almacenamiento. El modelo seguido está dado por la siguiente ecuación (Beek, 1996):

Q=P-E-S

Ecuación 1

Donde: P= precipitación total en mm (entrada)
Q= escurrimiento total en mm
E= evapotranspiración total en mm (pérdidas)
S= almacenamiento (incluye cambios en el almacenamiento de la humedad del suelo).

La medición del balance hídrico superficial usualmente se emplea para periodos largos (un año), para condiciones similares de almacenamiento natural mínimo del suelo (Gregory y Walling, 1985). En periodos más cortos, la evaluación requiere un mayor cuidado y precisión al medir cada componente del balance hídrico. Para su desarrollo se utilizó el sistema de información geográfica ILWIS v. 2.2 (ITC, 1998).

Obtención de variables del terreno.

Se digitalizaron los mapas base editados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática de México (INEGI) para la escala 1:50,000 de los siguientes temas: Topografía, Geología y Edafología. Las unidades geomorfológicas del área fueron tomadas de Fuentes (2000). A partir de los mapas de suelo y registros en campo, se derivaron los de textura y pedregosidad. Finalmente, a partir del mapa topográfico se derivaron el modelo digital de terreno, el mapa de pendientes y los límites de las subcuencas.

El mapa de coberturas se obtuvo mediante interpretación de fotos aéreas a escala 1:25,000 de GEOAIR para el año 1996, ajustándose dicha interpretación mediante la clasificación de la imagen de satélite

LANDSAT TM para el año 1997 y posteriormente, con el objeto de comparar dos fechas, se realizó el cálculo del balance hídrico para el año 2003 con la cobertura de dicho año a partir de la interpretación de imágenes Aster elaborada por Garrido (2003) y modificada por el autor.

Análisis hidro-meteorológico

Temperatura

Los datos de temperatura media mensual se obtuvieron utilizando los registros de temperatura media mensual para el período 1970-1985 de doce estaciones circundantes al Pico de Tancítaro y una más con datos anuales que se localizaba en la cima del Pico de Tancítaro. Se verificaron los datos faltantes y se recalcularon mediante la media aritmética simple (fueron muy escasos los meses con ausencia de datos). Posteriormente se calcularon los mapas de temperatura mensual aplicando primero, el método de corrección por altitud (Agricultural Compendium, 1981; García, 1984) y después utilizando el método de interpolación lineal mediante el promedio ponderado para el trazo automático digital de los mapas de temperatura mensual.

Precipitación

Para los mapas mensuales de precipitación se puso especial énfasis en la generación de los datos tomando en cuenta las condiciones climáticas regionales, la existencia de una estación auxiliar (con datos anuales que fueron desagregados) del sitio de estudio y la consistencia de la base de datos.

Para validar y ajustar los datos de aquellas estaciones que presentaron inconsistencias, se utilizaron los registros de cinco estaciones vecinas con registros pluviométricos mensuales de más de 20 años. Las estaciones de referencia que se utilizaron para corregir y/o verificar la consistencia de las demás estaciones fueron las de Chorros del Varal, Jicalán, Los Limones, Parácuaro y Taretan.

La corrección solo se requirió para la estación Los Reyes y ésta se realizó mediante el análisis estadístico basado en el método de la Curva de Doble Masa para evaluar la confiabilidad de los datos. Los mapas de precipitación mensual se obtuvieron mediante la consecución de los siguientes pasos específicos:

a) Ubicación de estaciones cercanas, con registros de más de 20 años.

b) Elaboración del mapa de isoyetas mensual, mediante interpolación lineal realizada en el SIG ILWIS v.3.3. En este caso, ILWIS elabora la interpolación de los puntos de las estaciones con los valores de precipitación mediante una herramienta denominada *Moving average* (Media Movil) utilizando el inverso de la distancia a través de promedios ponderados.

Evapotranspiración potencial (ETP)

Se utilizó la fórmula de Serruto (1993) la cual requiere únicamente de la temperatura media mensual como dato de entrada y la radiación solar calculada por la FAO (1976), para la latitud correspondiente a la zona de estudio. Se prefirió utilizar esta fórmula debido a que únicamente se contó con los datos de temperatura. Otras como la de Blaney y Criddle o la de Penman (citados por FAO, 1976) requieren otros datos además de la temperatura, y la de Thornthwaite y Mather (1955) resultó menos eficiente de acuerdo con las pruebas estadísticas aplicadas a zonas montañosas por Serruto (op. cit.).

La fórmula de Serruto calcula la evapotranspiración potencial con la siguiente expresión:

$$ETP_m = (0.003 * (RS)^{2.5} + 0.16 * (T_m)^{0.88}) * 31 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

T_m = temperatura promedio mensual en °C (mapas corregidos)

RS = Radiación Solar en equivalente de evaporación de mm/día

Escurrimiento y Precipitación Efectiva (Pef)

El escurrimiento superficial como un derivado de la lluvia, no contribuye al almacenamiento de humedad en el suelo ya que constituye el remanente que existe una vez que el suelo se ha saturado.

El cálculo de escurrimiento se determinó mediante la relación existente entre la precipitación, la cobertura vegetal, la pendiente y la velocidad de infiltración.

Tomando valores de equivalencia entre la textura del suelo y la velocidad de infiltración según el U.S. Army Corps of Engineers (1994), se elaboró el mapa correspondiente de velocidad de infiltración. Enseguida, tomando en cuenta que el escurrimiento superficial es una función de la cobertura vegetal, la pendiente y la velocidad de infiltración, se elaboró una tabla que relaciona estos elementos para obtener un factor de escurrimiento (US Soil Conservation Service, 1964). Este factor se multiplicó posteriormente por cada mapa de precipitación mensual, para crear los mapas de escurrimiento de cada mes.

La precipitación efectiva está definida por la expresión:

$$P_{ef} = P - I_a$$

Donde:

P_{ef} = Precipitación efectiva

P = Precipitación

I_a = Abstracciones

La lluvia efectiva es aquella porción de la lluvia total que no se retiene sobre la superficie ni se infiltra, por lo tanto, es el volumen precipitado que produce el escurrimiento directo, también llamado gasto rápido. Las abstracciones o pérdidas son la parte de la lluvia que se infiltra, intercepta y almacena en la superficie por las irregularidades del terreno, y la que se evapora durante el evento. Por ello, la lluvia efectiva está determinada por la condición de la capacidad de almacenamiento de la cuenca, al momento en que ocurre un evento de lluvia.

Retención de humedad en el suelo

La retención de humedad del suelo, se generó a partir de los mapas de textura y pedregosidad del suelo, tomando como dato general una profundidad efectiva del suelo de 1 m . Los datos de texturas se obtuvieron mediante trabajo de campo y se complementaron con los mapas de suelos de INEGI (1983).

Los mapas de pedregosidad y textura se cruzaron a través de una tabla de dos dimensiones donde cada campo resultado del cruce, se reclasificó con base en una tabla de capacidad de retención de humedad potencial del suelo (USCS, citado por Beek, 1996). Sin embargo, hay que recordar que la presencia de capas u horizontes con variaciones en texturas, porosidad, profundidad, etc., afectan el movimiento del agua y por ende la capacidad de retención de humedad por el suelo. Por esta razón la capacidad de retención de humedad se debe evaluar directamente en el campo siempre que sea posible.

Cálculo del almacenamiento real de humedad

El almacenamiento real o actual varía con el tiempo debido a la precipitación efectiva y a la evapotranspiración. Por ello, es necesario reflejar estas variaciones mensuales, tomando en cuenta que el mes anterior puede almacenar agua, siempre y cuando haya precipitado la suficiente agua como para permitir el almacenamiento en el suelo y con ello, para el siguiente mes se tendría aporte al almacenamiento del suelo. La evapotranspiración tiene el efecto contrario restando agua cada mes, llegando a ser crítico cuando la precipitación efectiva ha disminuido o es inexistente.

El almacenamiento real se calculó con la siguiente fórmula:

$$S_{(a)m} = (P_{(ef)m} + S_{(a)mes-1}) - ETP \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$S_{(a)m}$ =almacenamiento real en mm

$P_{(ef)m}$ =Precipitación efectiva en mm

$S_{(a)mes-1}$ =almacenamiento real del mes anterior en mm

ETP =Evapotranspiración potencial

Los cálculos se inician a partir del mes que se asume, presenta retención de humedad, es decir a partir de junio ya que el mes de mayo es el primer mes de lluvia en nuestro caso. Para el mes de junio se utilizó el mapa de retención como valor del almacenamiento del mes de mayo.

Déficit de Agua Mensual.

El déficit hídrico ocurre cuando la evapotranspiración es mayor a la precipitación efectiva, manifestándose un almacenamiento igual a cero y requiriendo las plantas más agua para transpirar (Morales y Saavedra, 1998).

El déficit de agua fue calculado mediante la siguiente fórmula y aplicado automáticamente a todos los meses a través de un script o programa de ILWIS:

$$\text{Déficit de agua} = ETP_m - (P_{(ef)m} + S_{(a)mes-1}) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

Etp- evapotranspiración potencial de cada mes

$P_{(ef)}$ - precipitación efectiva

$S_{(a)mes-1}$ -almacenamiento real del mes anterior

Los cálculos iniciaron en el mes de junio obteniéndose un mapa por cada mes. Debido a que los valores obtenidos no pueden tener valores negativos, se realizó un ajuste de dichos valores para reclasificarlos con valor de 0.

Excedente de agua Mensual.

El excedente de agua se calculó con la siguiente fórmula, aplicándose también un script para automatizar el cálculo de los doce mapas:

$$\text{Excedencia de agua} = P_{(ef)m} - E_{ta_m} - S_{(a)m} + S_{(a)mes-1} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

E_{ta} = ETP

$P_{(ef)m}$ - precipitación efectiva

E_{ta_m} - evapotranspiración real (calculada a partir de la suma mensual de la precipitación efectiva y el almacenamiento real ya explicados anteriormente)

$S_{(a)m}$ - almacenamiento real del mes

$S_{(a)mes-1}$ -almacenamiento real del mes anterior

Se obtuvieron de igual manera, doce mapas de excedencia de agua.

En este caso, se realizó el mismo procedimiento de reclasificación de valores negativos a valores de 0.

Aforos de ríos y manantiales

La ubicación de manantiales y ríos o arroyos, se realizó mediante entrevistas a autoridades, búsqueda en oficinas de gobierno relacionadas con el manejo de agua, a través de su reconocimiento en los mapas a escala 1:50,000 de INEGI y mediante pláticas informales con lugareños y usuarios. El resultado fue un inventario de al menos 40 manantiales localizados y medidos; y de 10 puntos correspondientes a 10 salidas de cuenca; además, diversos puntos de aforo en arroyos pero que no constituían una salida de cuenca (Figura 26).

Se estableció como meta, la medición estacional de los ríos permanentes que drenan las cuencas del Tancitaro y lo mismo se hizo para los manantiales. De esta forma, se realizaron al menos dos mediciones por cada estación (lluvias y secas) entre los años 2002-2003 y 2004. Lo anterior porque los patrones de caudal responden en el Tancitaro a la presencia o ausencia de lluvias. También se procuró llevar a cabo las mediciones en las mismas secciones de los ríos y cuando esto no fue posible debido a cambios en la morfología del perfil del río, se anotó el cambio de la sección transversal.

El aforo de ríos se llevo a cabo mediante dos técnicas con el objeto de respaldar los datos obtenidos. Por un lado, se utilizó un molinete de copas marca Rossbach calibrado por la CNA para escurrimientos desde 100 Lps hasta $2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. La técnica utilizada es la señalada por el Manual de Aforos editado por CNA (2000). Por otro lado y de manera complementaria, se llevaron a cabo aforamientos de los mismos arroyos mediante el uso de la técnica del flotador que es a su vez una técnica de medición aproximativa, también referida en dicho manual. Cuando las corrientes tenían menos de 100 Lps d siempre se utilizó esta última técnica para medir el caudal.

Debido a que estas técnicas requieren de la medición de las secciones transversales de los sitios de

aforo, cada vez que se regresaba al lugar, se realizaba el levantamiento de dichas secciones.

El cálculo final del caudal se realizó mediante el llenado de una hoja especial de cálculo elaborada en Excell (v. 2002). Un ejemplo de dicha hoja de cálculo se muestra en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Hoja de cálculo para la obtención del volumen de agua mediante aforo de arroyos con Molinete.

HOJA PARA AFORO CON MOLINETE ROSS-MEX-P-3074															
SITIO: SALIDA CUENCA ZACANDARO											FECHA: 28-May-02/ novena salida				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	SONDEOS				MOLINETE			VELOCIDAD			SECCIÓN			Gasto	Observaciones
	Dist. a punto inicial	Tirante	Prof. de observación		No. Revs.	Tiempo	Rev/s	En el punto	Coef.	Media del tramo	Ancho	Tirante medio	Área	parcial	Tabla de agua a 4.5 cms menos (marca de agua)
	m	m	Método	m	(rps)	(seg)	(rps)	m/s		m/s	(m)	(m)	(m2)	(m3/s)	
A-B	0.2	0.44	6/10	0.36	7	0.00		0			0.4				
A-C	0.4	0.48		0.06											
A-D	0.6	0.45		0.48	6	61.00	0.24	0.18				0.455	0.182	0.03	
A-E	0.8	0.42		0.07											
A-F	1	0.325		0.11	5	61.00	0.40	0.30				0.1775	0.071	0.02	
A-G	1.2	0.26		0.13											
A-H	1.4	0.22		0.09	6	79.00	0.12	0.13				0.205	0.082	0.01	
A-I	1.6	0.2		0.19											
A-J	2.8	0.13		0.17	5	68.00	0.22	0.18				0.2925	0.117	0.02	
A-K	2	0.1		0.17											
A-L	2.2	0.8		0.17	5	60.00	0.33	0.24				0.2775	0.111	0.02	
A-M	2.4	0.7		0.16											
A-N	2.6	0.5		0.17		65.00	0.30	0.24				0.2775	0.111	0.027	
Ecuación: V=mN+b								1.31					1.116	0.127	
m= 0.01178		b= 0.01266			Rango de caracterización:0.20000-2.70000 m/s										

El aforo de manantiales se realizó de manera directa, utilizando un recipiente de volumen conocido y tomándose el tiempo en segundos en que éste era llenado por el caudal. Debido a que hubo grandes rangos en los caudales presentados por los manantiales, se utilizaron diversos recipientes que fueron medidos en laboratorio mediante probetas graduadas. Los recipientes utilizados fueron cubetas y tambos de plástico desde 50 Lps hasta vasos o recipientes pequeños de solo unos cuantos mls⁻¹. En todos los casos se obtuvieron un mínimo de dos mediciones por estación (lluvias y secas).

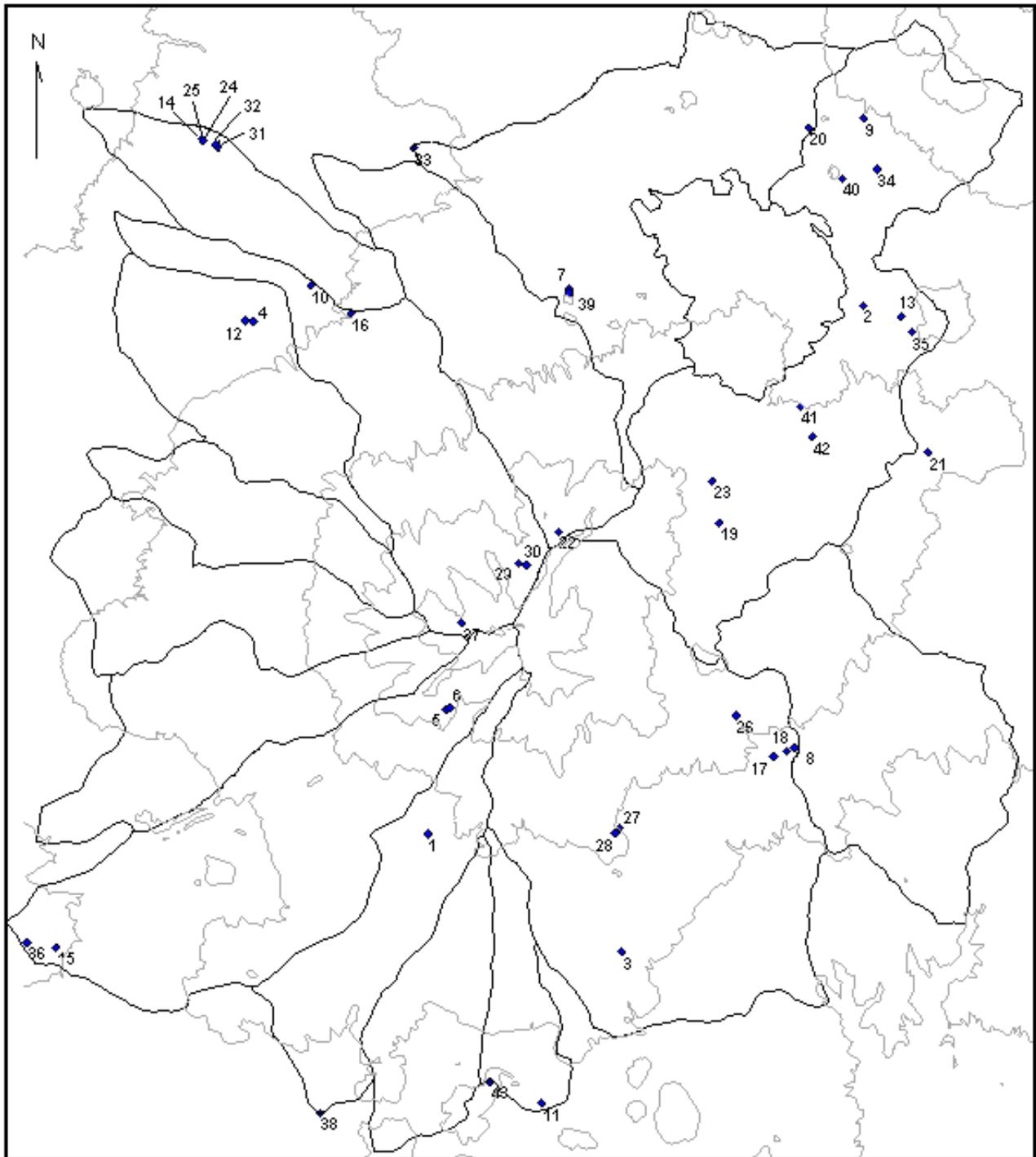


Figura 26. Localización de cuencas y manantiales aforados en el Pico de Tancitaro.

Fuente: Elaboración propia.

Oferta de agua superficial

La oferta de agua se determinó en dos pasos. El primero fue con base en el uso de un modelo de simulación espacialmente distribuido aplicado en un ambiente SIG para estimar el balance hídrico superficial del Pico de Tancítaro. Para ello, se adaptó la metodología empleada por Beek (1999) y Fuentes (2000 y 2004). Dentro de este mismo paso, se buscó combinar el balance hídrico con medidas morfométricas de las cuencas para tratar de explicar el comportamiento hallado en el balance hídrico y en los resultados de las mediciones directas del segundo paso.

Muchos estudios incluyen en su análisis del balance hídrico las medidas morfométricas de las cuencas en cuestión. Esto se hace porque muchos de los parámetros morfométricos se relacionan con el comportamiento hídrico de la cuenca. Entre dichos parámetros están el área de la cuenca, la pendiente del curso principal y general de la cuenca, la forma de la cuenca, etc. Y aunque dichos parámetros son sólo indicativos, permiten elaborar correlaciones que explican los resultados del modelamiento del balance hídrico superficial o bien de algunos elementos de éste (Verstappen, 1988; Campos, 1987; Goudie et al., 1981; Gregory y Walling, 1985).

El segundo paso se realizó a partir de mediciones de caudales o aforos de ríos y manantiales bajo un esquema de toma de datos estacional (época de secas y época de lluvias). Los datos así obtenidos son indicativos únicamente ya que no constituyen series de tiempo. Pero, convenientemente combinados y utilizados con los demás datos, permiten explicar, estimar y fundamentar la riqueza hidrológica del Pico de Tancítaro.

Los datos de campo se pueden correlacionar indistintamente con el modelo de balance hídrico y con los parámetros morfométricos de las cuencas, obteniendo así tres elementos de información para ajustar la estimación del recurso hídrico.

Demanda social de agua

Es importante mencionar que en el presente estudio no se consideran las demandas ecológicas de agua, ni las demandas del sector ganadero. La demanda de agua bajo estudio se obtuvo fundamentalmente de datos preexistentes proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (dependencia dedicada al manejo, uso, administración y protección del agua), así como de los censos poblacionales de INEGI.

Dos grandes grupos de usuarios fueron analizados:

1. El consumo doméstico, referido a la cantidad de agua utilizada por una familia sin precisar su distribución (solo el uso global del agua en una familia) y;
2. El consumo de agua en riego para el cultivo de aguacate.

La información se discriminó y se agrupó en datos que fueran significativos para la investigación. Se hizo estadística descriptiva para algunos rubros y se combinó con datos obtenidos en campo mediante entrevistas informales y abiertas a campesinos y habitantes de la región.

En el caso del consumo doméstico, se diferenció de acuerdo con el nivel de ingresos propuesto por CNA (1994). Esta forma de distinguir el consumo de agua permite una estimación realista de los volúmenes utilizados por cada familia en cada poblado.

En el caso del uso del agua para riego, se obtuvieron datos de entrevistas también informales realizadas a productores de la región, dentro del área de estudio. Estos datos fueron comparados con datos técnicos que se recomiendan para el riego del aguacate.

Escenarios de disponibilidad de agua

Al final del presente trabajo se estableció la conveniencia de construir tres escenarios para obtener una visión más clara para fines de planeación y manejo del agua. El primer escenario, refleja la situación actual de oferta y demanda, el segundo corresponde a un escenario pesimista, y el tercero contempla un escenario optimista. Para la construcción de los tres escenarios se establecieron dos ejes o criterios comunes:

- la cobertura vegetal, en su relación con la demanda y oferta,
- el aumento o disminución de la población actual según se trate del escenario pesimista u optimista.

Evidentemente, para el escenario actual (el real) se considera la población reciente o actual además de todos los estimados de oferta y demanda de agua desarrollados a lo largo de la investigación.

Escenario pesimista

Para el escenario pesimista, se aplicaron las siguientes premisas:

1. La población crece al ritmo nacional actual, por lo tanto, hay incremento en la demanda de agua.

2. La cobertura natural disminuye de acuerdo con la máxima tasa de deforestación estimada (función de distancia) entre 1974 y 1996 y que es del 1.12% anual, aumentando asimismo, la cobertura de aguacate hasta el límite natural permisible (cultivo potencial del aguacate).

Con este escenario se prevé entonces la disminución de la oferta y el aumento de la demanda, tanto por el riego de cultivos como por el aumento poblacional de acuerdo con los parámetros de consumo definidos por CNA (1994).

Escenario optimista

El escenario optimista de la demanda de agua tuvo como premisas las siguientes:

1. Disminuye la tasa de población en la región al ritmo estatal del 2005 de acuerdo con INEGI, que es una tasa negativa de -0.15 % anual.
2. La cobertura presenta recuperación de áreas al menos en los límites del parque nacional, sobre todo en aquellas zonas que hoy en día son pastizales y arbustos; en las áreas situadas fuera del parque nacional, los bosques abiertos presentan recuperación pasando a ser bosques cerrados.

Para el caso de la cobertura del terreno, se estimó el desarrollo de la cobertura forestal asumiendo un escenario optimista en el que los bosques mixtos de pino-encino y encino-pino de cobertura abierta se recuperan, pasando a ser coberturas de bosques cerradas. Este escenario considera la disminución de la demanda y el aumento de la oferta debido a la recuperación de coberturas de bosque.

CAPÍTULO 3. OFERTA DE AGUA SUPERFICIAL

Características de la precipitación

La precipitación que se presenta en la región del Pico de Tancítaro, responde a una serie de variables que a continuación se explican.

En principio, la República Mexicana posee un relieve variado en el que destacan para nuestro caso de estudio, la Sierra Madre del Sur, el Eje Neovolcánico Transversal, la Sierra Madre Occidental y la parte sur de la Altiplanicie Mexicana.

Estas provincias fisiográficas influyen permitiendo o impidiendo el paso de vientos regionales de la circulación atmosférica o bien, facilitando o impidiendo también el calentamiento o enfriamiento del aire.

Otros factores que influyen en la presencia de lluvias en Tancítaro, son la variación altitudinal, la latitud, la circulación general de la atmósfera para esta zona, la presencia de ciclones en la mitad lluviosa del año y la influencia de vientos del norte especialmente cuando éstos llegan a ser más profundos.

La lluvia en el Pico de Tancítaro está sujeta a la estacionalidad de la región presentándose los picos de lluvia máxima en la mitad caliente del año (mayo a octubre), específicamente en julio que es cuando se presenta el mayor pico de lluvia (Figura), además, la cantidad de lluvia durante la temporada de lluvias y para cualquier estación considerada en este estudio, siempre es mayor al 88% del total del año lo que nos indica la gran concentración de la precipitación durante dicha temporada y nos da indicación también del aumento en dos de los demás componentes del balance hídrico como son la infiltración y el escurrimiento los cuales también presentan sus picos en dicha temporada de lluvias.

Para el caso de esta investigación, se consideraron los datos de 13 estaciones cercanas al aparato volcánico o inmersas en él (Cuadro 10) como en el caso de las estaciones de Peribán y Tancítaro, aunque también hay estaciones ligeramente lejanas como Apatzingán, Nueva Italia, Taretan y Parácuaro.

Cuadro 10. Datos de precipitación de las estaciones consideradas en el estudio.

Estación climática	MESES DEL AÑO													Precipitación Anual	Lluvia invernal		% según temporada	
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Altura		(%)	(mm)	Secas	Lluvias
Punta de agua, Buenavista	13.5	0.6	2.9	1.3	18.1	148.8	144.8	137.1	147.1	46.5	20.4	5.6	279	686.4	3.2925	22.6	9.1	91.0
Apatzingan, CFE	21.6	1.6	0.7	0.7	21	134.2	178.8	167.6	186.1	81.7	28.8	13.5	320	836	4.4737	37.4	10.5	89.5
Nueva Italia, Zaragoza	18.1	0.8	0.1	3.5	27.9	158.5	157.1	142.6	131.3	48	16.1	1.7	460	705.5	2.9341	20.7	9.7	90.4
Paracuaro, Paracuaro	10.5	1.3	1.6	4.2	26.8	182.4	226.1	223.1	209	97.1	18.5	2.6	498	1003.2	1.5949	16	6.5	93.5
Charapendo, Gabriel Zamora	27.4	16.1	5.4	8.9	36.8	192.9	281.3	229.5	239.7	96.5	75.9	19.7	1000	1196.3	5.7343	68.6	15.9	86.9
Taretan, Taretan	25.2	3.9	2.3	2.7	38.2	231	295.5	208.6	229.6	87.4	35.5	5.6	1170	1165.7	3.1741	37	9.7	90.3
Los Chorros del varal	21.1	6.4	2.2	3.2	47	173.7	204.6	166.1	200	83.1	29.8	9.1	1225	946.2	4.1006	38.8	12.6	87.5
Los Limones, Los Reyes	25.3	5.5	1.8	4.6	29.3	182.8	251.9	188.9	210.8	99.1	34	8.8	1225	1042.7	3.9705	41.4	10.5	89.5
Los Reyes, Los Reyes	14.3	5.2	2.3	1.9	32.8	166.8	183.5	180.8	161.2	80.9	21.9	9.2	1280	860.9	3.6009	31	10.2	89.8
Jicalan, Uruapan	30.4	8	4.2	15.2	50.8	268.8	340.9	303.9	302.7	124.9	40.4	12.8	1610	1502.8	3.6865	55.4	10.8	89.2
Uruapan, Uruapan(CFE)	40.3	12.4	7.9	12.8	46	271.5	346.3	340.6	321.7	138.2	32.1	15.3	1610	1584.8	4.7892	75.9	10.5	89.5
Periban, Periban	19.3	6.2	4.2	1.3	29.1	207.4	306.3	272.3	242.9	119.2	38.8	8.5	1630	1255.2	3.0433	38.2	8.6	91.5
Tancitaro	19	4.4	2.4	3.9	29.1	167.8	206.5	181.8	184.2	78	25.6	7.9	3800	910.5	3.7013	33.7	10.1	89.9

Los periodos considerados de precipitación siempre fueron mayores a 15 años, de los cuales se obtuvieron las medias mensuales y anuales. En algunos casos fue necesario rellenar los datos debido a la ausencia de éstos, utilizándose para ello, la técnica de la curva doble-masa, específicamente para la estación de Los Reyes.

Por otra parte, de los datos de precipitación se obtuvieron no solo la precipitación anual y mensual, sino también el porcentaje de lluvia invernal (que en ninguna de las estaciones rebasó el 5%) así como el porcentaje de lluvia para las dos mitades del año: lluvia y secas, con el objeto de establecer algunas relaciones con el balance hídrico (Cuadro).

Cuando se analizan las gráficas de distribución anual de la lluvia, podemos observar que la lluvia efectivamente se concentra en los meses de junio a octubre con porcentajes del total anual que varían entre 86% y 92%; y aunque hay lluvia significativa en los meses de mayo y noviembre, ésta no rebasa el 10% de la lluvia anual promedio de cada estación a excepción de las estaciones de Charapendo y Chorros del Varal. Lo anterior se traduce en la existencia de una estación seca muy marcada y otra de lluvia igualmente evidente en el año (Figura 27) que afectan directamente al volumen de agua tanto de ríos permanentes y escurrimientos de temporal como al de los manantiales registrados.

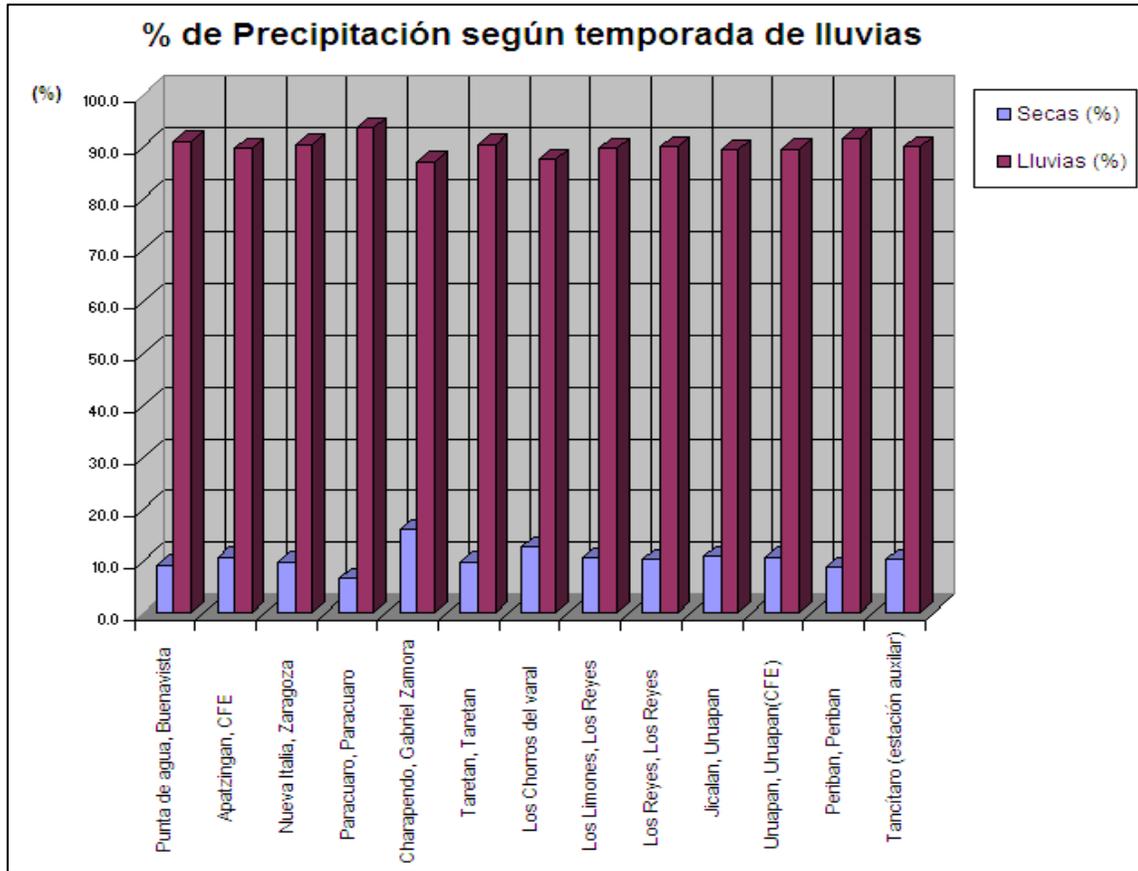


Figura 27. Porcentaje de precipitación para cada estación del área de estudio en las temporadas de secas y lluvias.

Fuente: Base de datos ERIC I y II.

Por otra parte se ha considerado importante el observar la relación que guarda la altitud con la precipitación, toda vez que dicho comportamiento en la región afecta al modelo de balance pues tiene la particularidad de que la lluvia va aumentando con la altitud pero, al llegar a cierta altitud, ésta vuelve a disminuir tal como se muestra en la figura 28.

Como resultado de este comportamiento de la lluvia en altitud, el balance hídrico refleja déficit más altos en la parte superior de la montaña que en la parte media (de aquí que la vegetación sea de *Pinus hartwegii* y encinos) y recíprocamente, superávit menores respecto a la misma zona media de la montaña (que presenta vegetación más densa de pino, encino, ailes y abetos).

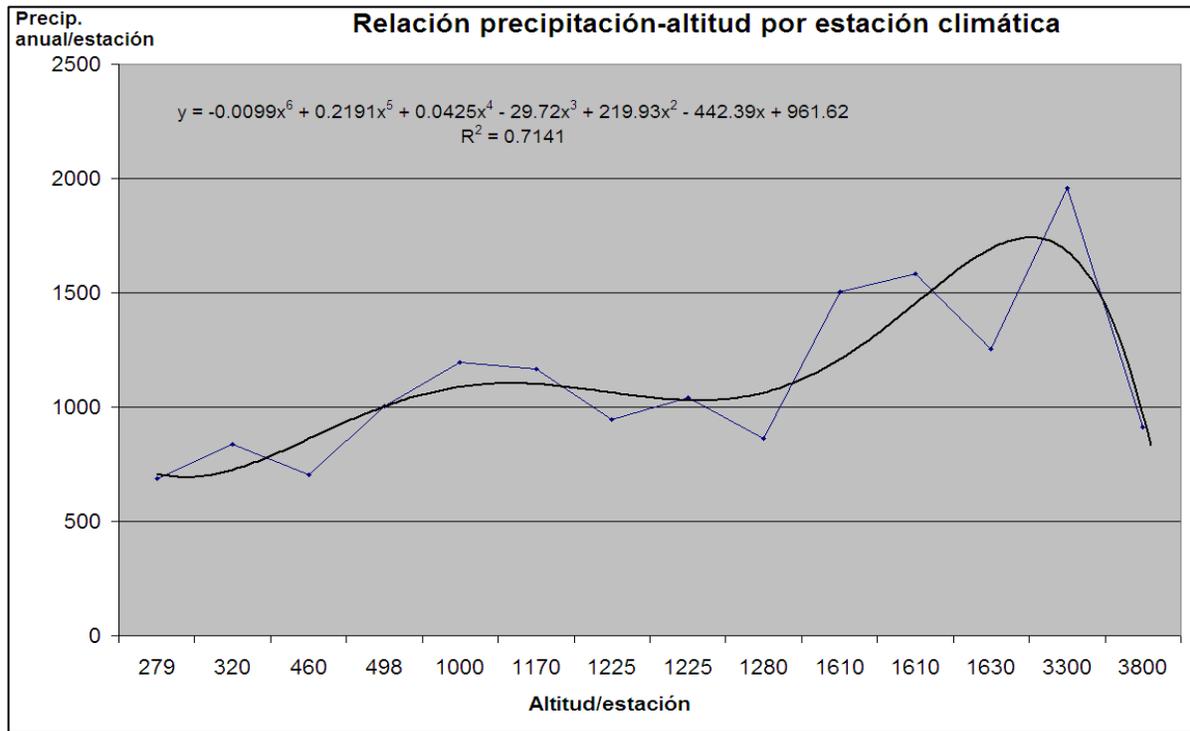


Figura 28. Relación de la precipitación con la altitud para estaciones cercanas al Pico de Tancítaro.

Finalmente, se ha estimado la cantidad de lluvia durante un año para cada cuenca del Tancítaro, los valores estimados resultan de la interpolación de los datos de precipitación media anual de las estaciones mencionadas para este estudio y multiplicados por el área de la cuenca, es decir, los milímetros de lluvia multiplicados por el área de cada cuenca para obtener el volumen de agua precipitada durante un año. Los datos pueden verse en el cuadro 11 el cual muestra el hecho de que hay una relación directa entre el área de la cuenca (o tamaño) y la cantidad precipitada en cada una de las cuencas, lo que también nos indica el volumen de agua disponible en el balance hídrico.

Cuadro 11. Volumen de precipitación anual por cuenca en metros cúbicos.

Cuenca	Área km ²	Volumen de agua (m ³)	Cuenca	Área km ²	Volumen de agua (m ³)
Apo	29.63	318,374.50	Huandiestacato	162.02	8,686,654.58
Chondo	45.49	804,896.63	La Culebra	102.67	3,794,802.22
Chuanito	20.65	157,126.83	La Gringa	12.51	55,496.76
Cuenca Rodada	33.81	326,054.10	San Francisco	41.71	513,689.37
Cutio	31.66	399,939.72	Tancítaro	66.12	958,085.55
El Chivo	21.19	130,382.52	Zacándaro	51.17	1,087,965.31
Hoyicazuela	20.34	163,429.43	Zirimóndiro	28.82	232,308.87

Fuente: Estimación propia.

Las cuencas con mayor precipitación corresponden a las de Huandiestacato, La Culebra y Zacándaro (entre 1 y 8.5 millones de m³), mientras que las de menor volumen precipitado en promedio, son las de La Gringa, El Chivo y Chuanito (menos de 157 mil m³) existiendo grandes variaciones no solo en función del área y la altitud, sino también por la localización geográfica de la cuenca.

Características de la Evapotranspiración

De acuerdo con Penman, 1956 (citado por Alonso en: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medio-ambiente/material-de-clase>), la evapotranspiración potencial es la cantidad de agua transpirada por un cultivo corto de césped que cubre el suelo en su totalidad y sin ninguna falta de agua. Constituye una pérdida en el balance hídrico y cuya demanda una vez que es cubierta por la precipitación, el resto del volumen se convierte en agua disponible.

En el área de estudio la ETP se estimó de acuerdo con el modelo descrito en el apartado de métodos, dicho modelo como se recordará estima cada uno de los elementos que componen el balance hídrico superficial, entre ellos, la Evapotranspiración. En este apartado sin embargo, se muestran los valores correspondientes a la Evapotranspiración Real.

El comportamiento de la evapotranspiración en el Pico de Tancítaro va siguiendo el patrón marcado por la insolación en buena medida, es decir por la marcha anual de la temperatura, por lo que evidentemente habrá mayor evapotranspiración durante la época más caliente del año que durante la época más fría.

De acuerdo con ello, los meses que presentan mayor evapotranspiración corresponden a los de abril, mayo, junio y julio. Mientras que los de menor evapotranspiración coinciden justamente con los de mayor precipitación como agosto, septiembre y octubre.

Tomando en consideración los datos estimados de precipitación por cuenca y la evapotranspiración real también por cuenca, es posible definir la cantidad de agua disponible, a partir de restar a la precipitación (P) el valor de la evapotranspiración real (ETA) hallando en este caso, valores positivos para todas las cuencas.

Cuadro 12. Precipitación, evapotranspiración y agua disponible por cuenca en el Pico de Tancítaro.

Cuenca	P Precipitación anual (mm)	ETA Evapotranspiración real anual (mm)	Agua Disponible (P-ETA)
Apo	1049.864	672.5747	377.2893
Chondo	1047.665	737.4411	310.2239
Chuanito	1085.171	613.4603	471.7107
Cuenca Rodada	1035.532	671.6518	363.8802
Cutio	1095.304	656.8506	438.4534
El Chivo	1056.578	627.8111	428.7669
Hoyicazuela	1057.168	698.7745	358.3935
Huandiestacato	1104.673	716.7782	387.8948
La Culebra	1073.304	701.2496	372.0544
La Gringa	1064.394	663.7471	400.6469
Lavas del Paricutín	1125.978	821.3953	304.5827
Nureto	1135.527	759.0219	376.5051
San Francisco	1070.77	764.8221	305.9479
Tancítaro	1029.106	661.8064	367.2996
Zacandaro	1160.508	696.1449	464.3631
Zirimóndiro	1041.989	661.0722	380.9168

Fuente: Elaboración propia.

Características del escurrimiento

El escurrimiento es un componente fundamental del balance hídrico, pues representa una pérdida en dicho balance. De acuerdo con Chow (citado por Maderey, 2005), el escurrimiento es “...**la parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores**”. Es decir que corresponde a la parte del ciclo hidrológico en la que el agua se desliza sobre o en la superficie terrestre sin intervención del hombre.

Son varios los factores que afectan al escurrimiento y pueden clasificarse de forma genérica en los siguientes tipos:

a. Factores climáticos.

En especial nos referimos a la forma, intensidad duración y distribución de la precipitación que condiciona enormemente el comportamiento del escurrimiento.

b. Factores fisiográficos.

Entre éstos tenemos a los morfométricos como el área de cuenca, la forma, la pendiente, la red de drenaje y la altitud; pero también están los de tipo físico y biológico como el tipo de suelo, la geología, la topografía y la cobertura y uso del suelo.

El escurrimiento que aquí se describe para cada cuenca (Cuadro 13) se obtuvo básicamente a partir del modelo empleado en el desarrollo del balance hídrico y es por esta razón, resultado de la estimación que dicho modelo hace con los datos provenientes de la precipitación medida en las estaciones climáticas consideradas y ya descritas con anterioridad.

Cuadro 13. Escurrimiento anual en mm por cuenca.

Cuenca	Área (km²)	Escurrimiento Anual (en mm)
Cuenca Rodada	33.84	349.115
San Francisco	41.8	352.29
Tancítaro	66.07	356.631
Chondo	45.55	364.778
Zirimóndiro	28.81	393.41
Apo	29.68	406.095
Hoyicazuela	20.33	412.75
Lavas del Parícutín	25.51	423.585
La Culebra	102.66	431.502
Nureto	84.76	462.058
Huandiestacato	60.78	496.401
Cutio	31.67	515.681
La Gringa	12.48	517.476
El Chivo	21.2	528.608
Zacandaro	51.16	540.48
Chuanito	20.68	540.911

Fuente: Elaboración propia basada en el modelo obtenido en SIG

Los valores de escurrimiento mostrados en la tabla pueden describirse agrupándolos en tres rangos de valores, los que corresponden a cuencas con rangos entre 349 y 393 mm promedio anuales en el que están las cuencas *Rodada*, *San Francisco*, *Tancítaro*, *Chondo* y *Zirimóndiro*; las cuencas con rangos menores a 500 mm promedio anuales (entre 406 y 496 mm) como son las de *Apo*, *Hoyicazuela*, *Lavas del Parícutín*, *La Culebra*, *Nureto* y *Huandiestacato* y finalmente; las cuencas con rangos menores a 600 mm (entre 515 y 540 mm) como las de *Cutio*, *La Gringa*, *El Chivo*, *Zacándaro* y *Chuanito*.

Aportaciones anuales de manantiales y corrientes principales en las cuencas del Tancítaro.

Aforo de manantiales y arroyos por cuencas

El volumen de agua que aquí se presenta corresponde al volumen de agua promedio obtenido para cada manantial y arroyo principal. Debido a que no están registrados eventos extraordinarios ni tampoco los manantiales o “lloraderos” de temporal, los valores finales están referidos al volumen base del Tancítaro, por lo que a este volumen debe agregarse un monto de agua no conocido debido a eventos

extraordinarios y a los manantiales de temporal, más el volumen de agua almacenado en los acuíferos.

Otro punto a considerar es el hecho de que las sumas están hechas con base en periodos de secas y lluvias. Dichos periodos van de noviembre a mayo en el primer caso, y de junio a octubre en el segundo. Debido a lo anterior, se observa que los volúmenes de secas son superiores a los volúmenes del periodo de lluvias. Esta aparente inconsistencia se debe a los retrasos observados por las recargas de ríos y manantiales cuyos volúmenes se ven aumentados para los meses de noviembre y diciembre en cuyos meses se realizaron una gran cantidad de mediciones. Por el contrario, los volúmenes se ven disminuidos durante los primeros meses de lluvias en los que también se realizaron una buena cantidad de registros de manantiales y ríos.

Se encontraron un total de 52 manantiales en toda el área de estudio (Figura 23). El aforamiento se llevó a cabo en forma directa captando el volumen total del manantial, midiendo el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido (ver capítulo de métodos). En el caso del escurrimiento superficial, del total de las 16 cuencas solo 7 presentaron escurrimientos permanentes en la boca de la cuenca. La medición se realizó al igual que en los manantiales, durante la época de secas y de lluvias. Cuando se presentaron escurrimientos en las demás salidas de cuenca, se realizaron mediciones (época de lluvias) y se anotaron los meses en que las salidas de cuenca no llevaban agua con el objeto de hacer un estimado del escurrimiento total. El Cuadro 14 muestra el resumen del volumen anual de los 52 manantiales y los escurrimientos.

Cuadro 14. Volumen de agua estimado en manantiales y ríos.

Cuerpo de agua	Gasto anual (m ³)
Manantiales	15,305,432.3
Ríos	27,792,912.27
TOTAL:	43,098,344.57

El Cuadro 15, sintetiza los valores medidos para cada cuenca en cuanto a su escurrimiento, mientras que en el Cuadro 16 se presentan los volúmenes de agua total por manantial aforado de cada cuenca. En este último cuadro se aprecia que el número de manantiales es de 46 y no de 52; la razón de esto es que en un mismo sitio se llegaron a ubicar diferentes nacimientos de agua, los cuales se agruparon en uno solo, como en el caso del manantial La Hortensia donde se hallan un total de 4 pequeños manantiales, y en el Nopal-El Salto-El Tlacuache que en realidad son 3 (Figura 29).

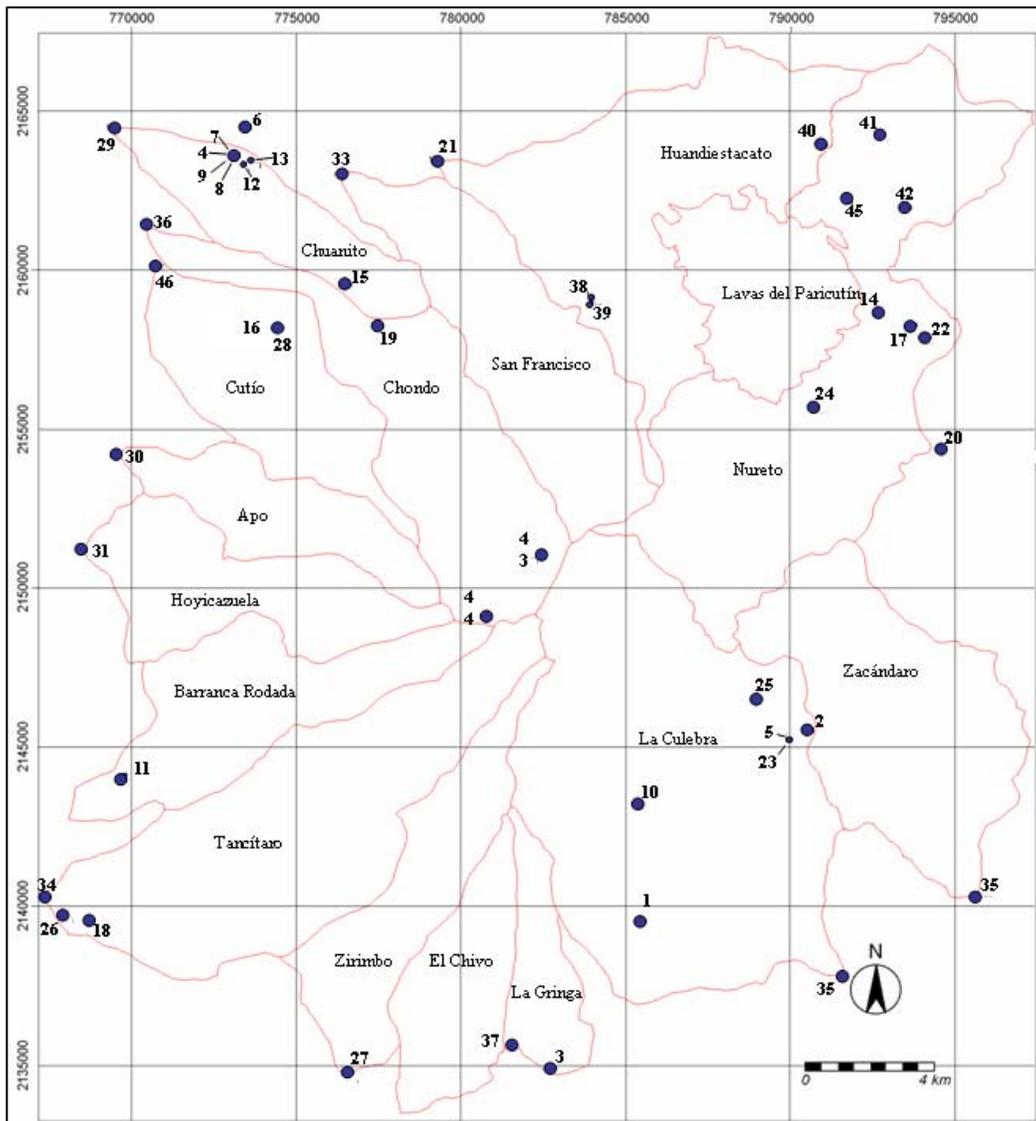


Figura 29. Localización de manantiales y salidas de cuenca para aforamiento.

En la Figura 30, se presentan los valores por cuenca comparando las épocas de lluvias y secas contra el valor anual. De estos datos, se puede apreciar que los valores de secas superan a los de lluvias debido a lo explicado anteriormente. Asimismo, es posible afirmar que la cuenca con mayor producción de agua por manantiales es la de Huandiestacato. Es probable que el mayor volumen se deba a que esta cuenca recibe el agua captada por la unidad hidrológica Lavas del Paricutín, la cual no presenta escurrimiento superficial pero si una extraordinaria capacidad para infiltrar el agua. Es muy importante mencionar que en dicha cuenca se ubican dos manantiales importantes que le dan ese valor a la producción de agua.

Cuadro 15. Volumen de manantiales por cuenca según periodo de lluvias y secas

Volumen de agua producido por los manantiales				
Cuenca	PERIODO			
	Secas (m ³ /s)	Lluvias (m ³ /s)	Promedio	Anual (m ³)
Chondo	12.92	11.80	12.36	389,773.7
Chuanito	28.01	31.80	29.91	943,205.8
Cutio	12.53	3.84	8.18	258,009.8
Huandiestacato	290.96	276.38	283.67	8,945,911.7
La Culebra	54.28	44.43	49.35	1,556,376.4
La Gringa	24.55	22.00	23.28	734,055.9
Nureto	20.86	12.84	16.85	531,468.1
Tancitaro	52.50	70.29	61.39	1,936,124.0
Zirimóndiro	0.36	0.31	0.33	10,506.9
TOTAL:				15,305,432.3

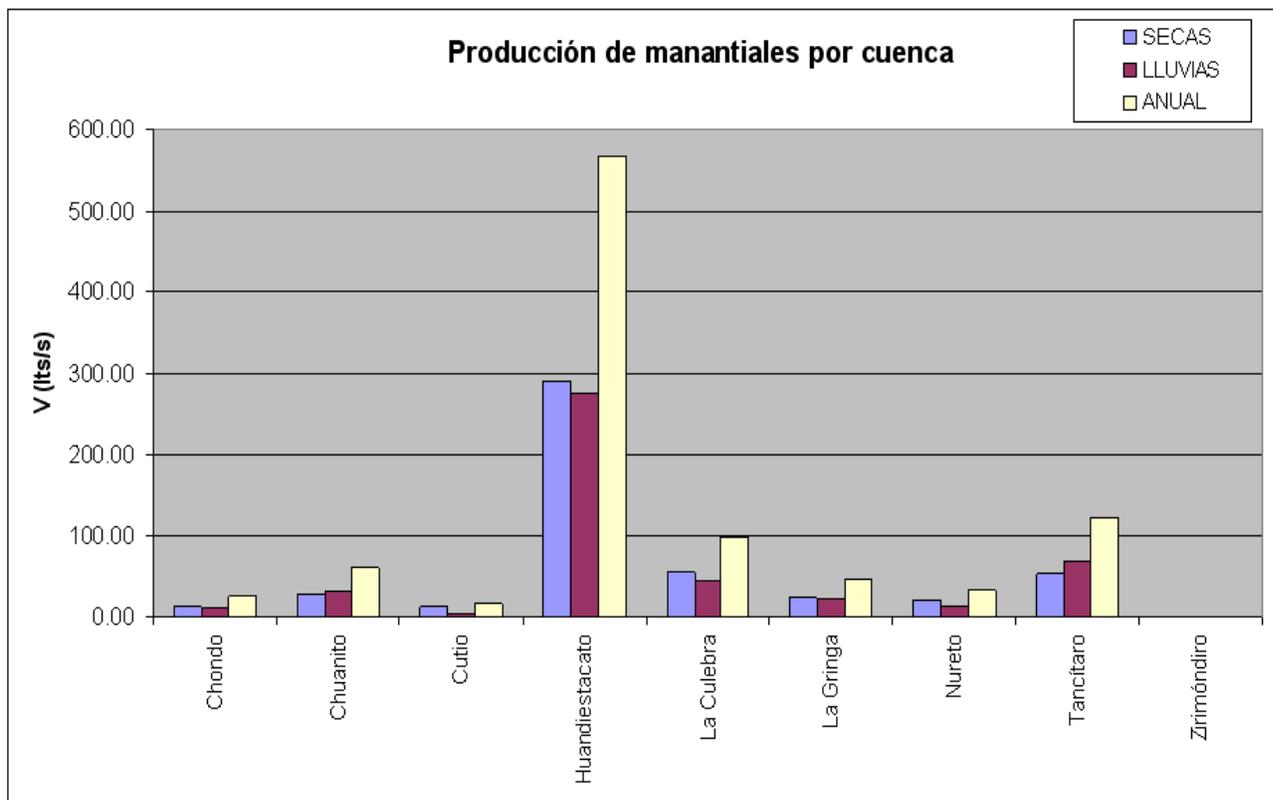


Figura 30. Volumen de manantiales por cuenca por periodo de lluvias y anual

Finalmente, el Cuadro 16 muestra el volumen promedio registrado para cada manantial y salida de cuenca.

Cuadro 16. Gasto en litros por segundo (Lps) de cada manantial y salida de cuenca.

Nombre	No.	Gasto (Lps)	Nombre	No.	Gasto (Lps)
Araparicuaro	1	0.500	Zirahaspan	24	0.072
Canoa Alta	2	5.320	La Hortencia	25	22.070
Junta El Tizate y La Noria	3	2.500	Páreo, Ojo de Agua	26	2.000
El Chorro (Sn. Fco. Peribán)	4	4.000	Querida	27	2.000
El Jagüey (El Durazno)	5	23.640	Rio Cutio	28	2.313
El Puente (Sn. Fco. Peribán)	6	1.000	Rumbo a Magallones	29	2.400
La Higuera 2 (Afloramiento)	7	0.520	Salida Cuenca Apo	30	20.000
La Higuera 3	8	0.132	Salida Cuenca Hoyicazuela	31	10.000
La Higuera, Sn. Fco. Periban	9	0.667	Salida cuenca La Culebra	32	40.000
La Soledad	10	5.000	Salida Cuenca San Francisco	33	15.400
Los Chorros	11	2.000	Salida Cuenca Tancitaro	34	20.000
Los Pastores (El Zaus)	12	5.135	Salida cuenca Zacándaro	35	40.000
Los Tepetates (Los Pastores)	13	0.325	Tancitaro Arroyo Chondo	36	4.844
Ahuanzan	14	0.717	Zirimbo	37	25.000
Chorros de Chuanito	15	16.720	Tiripita	38	150.000
Cutio	16	1.800	Tiripan (arenas)	39	2.000
Cuzato	17	0.135	Angahuan cerro	40	0.120
El Fresnito	18	1.000	Angahuan pila	41	0.600
El Granado	19	7.677	Angahuan	42	50.000
La Alberca	20	0.200	Puentecillas	43	60.000
Nuevo Zirosto	21	0.000	La Zafra grande	44	20.000
Pantzingo	22	0.270	Nureto	45	5.000
El Nopal-El Salto-Tlacuache	23	8.212	Salida Cuenca Cutio	46	1.000

Morfometría de cuencas

La morfometría de cuencas permite apreciar objetivamente los atributos y cualidades hidrológicas de las mismas y es también una herramienta para el conocimiento y manejo del recurso hídrico superficial (Verstappen, 1983; Gregory y Walling, 1985).

El Pico de Tancitaro da lugar a la formación de 16 cuencas obtenidas con base en la interpretación de las curvas de nivel para inferir el drenaje y tomando como límite la base del estratovolcán definido por el piedemonte inferior de dicha estructura (Fuentes, 2000a).

El Cuadro 17 muestra el listado de las cuencas con sus principales características.

Como se puede observar, las cuencas pueden agruparse en tres grupos por su tamaño relativo: pequeñas, medianas y grandes. El primer grupo de cuencas abarca áreas que van de los 12 a los 30 km²; el segundo grupo lo comprenden las cuencas entre 30 y 60 km²; y el último grupo, aquellas que tienen más de 60 km².

Cuadro 17. Cuencas hidrográficas del Tancítaro.

Cuenca	Clave	Área (km ²)	Elevación o altura media (m)	Perímetro (km)	Ancho (km)	Longitud cauce principal (km)
La Gringa	Grin	12,50	2084,4	20	2,8	8,5
Hoyicazuela	Hoy	20,30	2421,3	25,6	2,9	10,7
Chuanito	Chu	20,70	1782,3	24,3	2,9	11
El Chivo	Chi	21,20	2005,1	22,6	3,8	9,9
Lavas del Parícutín*	LP	25,50	2410,6	30,1	5,4	6,9
Zirimóndiro	Ziri	28,80	2266,8	34,4	3,5	14,3
Apo	Ap	29,70	2318,8	30,5	5,4	11,4
Cutio	Cu	31,70	1892,1	28,4	5	11,8
Cuenca Rodada	CR	33,80	2277,9	34,3	4,6	14,2
San Francisco	Fco	41,70	2473,5	34,7	4,5	14,1
Chondo	Cho	45,60	2609,8	42,3	4,4	13,2
Zacándaro	Zac	51,20	2224,0	34,8	6,5	12
Huandiestacato	Huand	51,80	2339,5	54,7	5,5	12,1
Tancítaro	Tan	66,10	2189,5	42,3	5,9	17,4
Nureto	Nur	84,80	2652,2	67,9	7,3	18,9
La Culebra	Cul	102,70	2453,6	45	9,8	15,9

*Se considera como unidad hidrológica diferenciada, pero no constituye una cuenca.

Para cada cuenca se estructuró una ficha morfométrica que resume los valores e índices obtenidos para cada una de ellas. En la descripción se hace referencia además a los rasgos bióticos, abióticos y antrópicos observados en forma general.

Cuenca Apo

La cuenca de Apo debe su nombre a la población y arroyo del mismo nombre y se ubica en la porción occidental del Pico de Tancítaro. Es una cuenca pequeña con 29.6 km², pero con un gran desnivel entre sus alturas mayores y menores. Es una cuenca de tipo alargada con elevación media mayor al promedio (Cuadro 18, Figura 31).

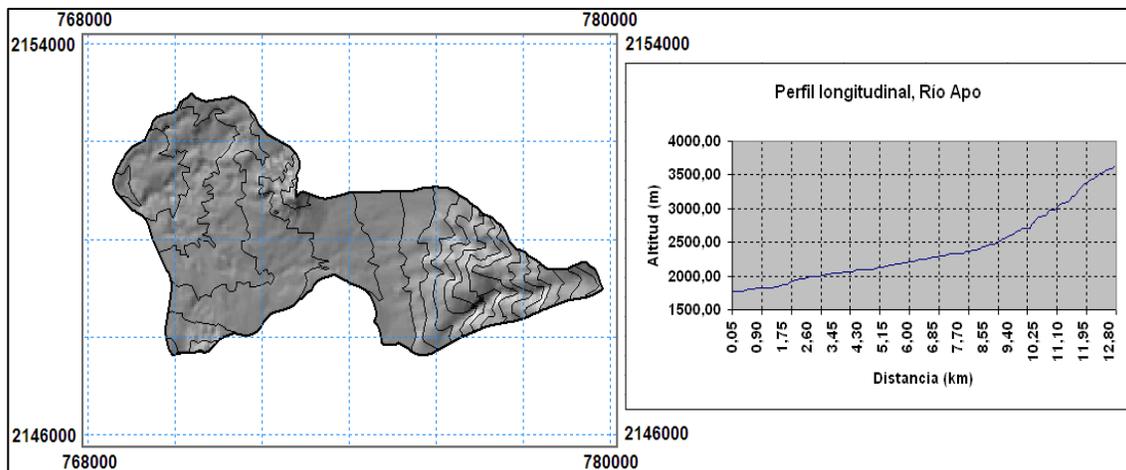


Figura 31. Cuenca y perfil longitudinal de Apo.

Sus características indican que se trata de una cuenca que favorece el escurrimiento de superficie por su forma y también porque el agua captada presenta recorridos cortos debido a su pendiente, lo que genera escurrimientos rápidos y por tanto escasas oportunidades para la infiltración.

Cuadro 18. Características morfométricas de la cuenca Apo.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	30,46	-
Longitud del cauce principal (km):	11,44	Medio
Ancho cuenca (km):	5,42	-
Elevación media (msnm):	2318,76	Moderada
Área (km ²):	29,68	Pequeña
Altitud mínima:	1780	-
Altitud máxima:	3700	-
Desnivel (m):	1920	Alto
Kf ¹ :	0,23	Ligeramente achatada
Kc ² :	1,567	De oval oblonga a rectangular oblonga
I ³ :	2,1	Moderadamente alargada
Km ⁴ :	78.1	Moderadamente montañosa
Orden de corriente:	5	Alto
Densidad de drenaje (km/km ²):	5,56	Alta
Número de escurrimientos:	237	Medio
Escurrimiento anual ponderado(mm)	457.43	
Pendiente del cauce principal:	0,17	Fuerte
Tc* (min):	57,5	Moderado
Población:	1548	-
Disponibilidad de agua:	Moderada	-

¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coefficiente de masividad, *Tiempo de concentración de Pizarro.

Cuenca Chondo

La cuenca Chondo debe su nombre al arroyo que forma su cauce principal (Cuadro 19, Figura 32). Se ubica en la porción noroeste del Tancitaro. Es una cuenca pequeña de menos de 50 km². El desnivel que presenta es muy pronunciado debido a que su cabecera coincide con las mayores altitudes del Pico de Tancitaro (3840 msnm) y su salida llega hasta los 1580 msnm. En esta cuenca los valores de forma, índice de alargamiento y de compacidad, indican moderada tendencia a acumular volúmenes importantes de agua. Su disponibilidad de agua se considera moderada debido a la gran cantidad de población y su relación con la cantidad de agua que tiene.

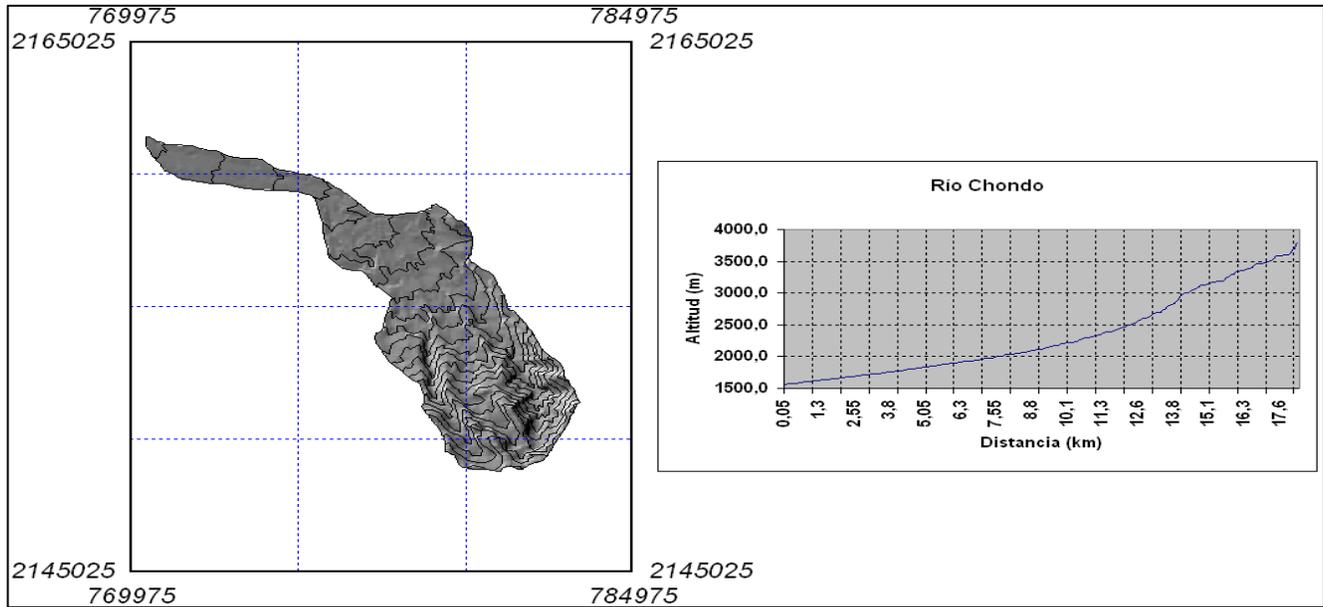


Figura 32. Cuenca y perfil longitudinal de Chondo.

Esta es una de las cuencas más interesantes ya que posee características únicas de tipo ambiental (varios pisos de vegetación), social (terrenos ejidales, comunales y privados) y económico (producción aguacatera más importante de la región).

Cuadro 19. Características morfométricas de la cuenca Chondo.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perim (km):	42,3	-
Longitud del cauce principal (km):	13,2	Mediano
Ancho cuenca (km):	4,4	-
Elevación media (msnm):	2609,8	Alta
Área (km ²):	45,55	Pequeña
Altitud mínima:	1580	-
Altitud máxima:	3840	-
Desnivel:	2260	Alto
Kf ¹ :	.26	Ligeramente achatada
Kc ² :	1,8	De oval oblonga a rectangular oblonga
I ³ :	2.98	Muy alargada
Km	57.3	Montañosa
Orden:	5	Alto
Densidad de drenaje (km/km ²):	5,0	Alta
Número de escurrimientos:	292,0	Medio
Escurrimiento anual ponderado(mm)	384.41	
Pendiente del cauce principal:	0,17	Fuerte
Tc* (min):	71,6	Lento
Población:	11519,0	-
Disponibilidad de agua:	Moderada	-

¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coefficiente de masividad *Tiempo de

concentración de Pizarro.

Cuenca Chuanito

La cuenca de Chuanito colinda con la anterior (Chondo) y se localiza por tanto, hacia el noroeste del Pico de Tancitaro. Es una cuenca de tamaño muy pequeño con 20.6 km² (Cuadro 20, Figura 33).

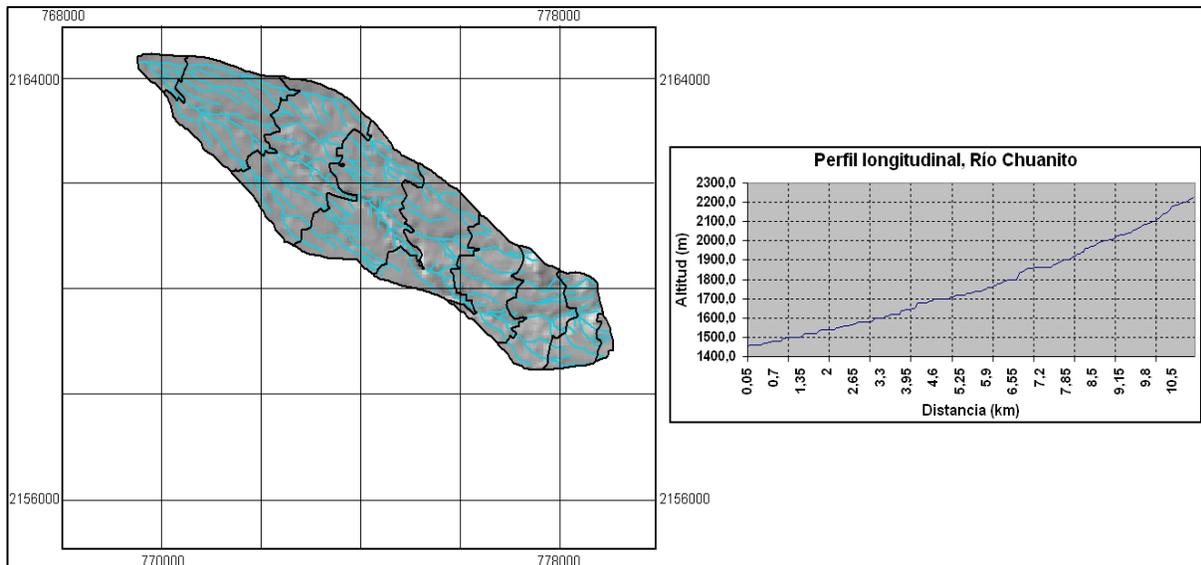


Figura 33. Cuenca y perfil longitudinal de Chuanito.

Con una longitud del cauce principal corto y un desnivel de 740 m, esta cuenca tiene un tiempo de concentración alto que se debe sobre todo a su perfil longitudinal con baja pendiente. La corriente principal es permanente y tiene una red de drenaje subparalela. Estas características y la ubicación en la parte baja del Tancitaro le permiten tener una alta disponibilidad de agua.

Otras características que dan indicación de lo anterior es la presencia de un cauce principal mediano con una densidad de drenaje alta facilitando así la captación de agua. Es un río permanente pero fuertemente modificado por el uso de su escurrimiento para el riego y de sus manantiales para el uso doméstico y de riego.

Cuadro 20. Características morfométricas de la cuenca Chuanito.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	24,3	-
Longitud del cauce principal (km):	11,0	Mediano
Ancho cuenca (km):	2,9	-
Elevación media (msnm):	1782,3	Baja
Área (km ²):	20,68	Muy Pequeña
Altitud mínima:	1460	-
Altitud máxima:	2200	-
Desnivel:	740	Bajo
Kf ¹ :	0,17	Muy poco achatada
Kc ² :	1,5	De oval redonda a oval oblonga
I ³ :	3,84	Muy alargada
Km	86.2	Moderadamente montañosa
Orden:	4	Medio
Densidad de drenaje (km/km ²):	4,2	Alta
Número de escurrimientos:	98,0	Bajo
Escurrimiento anual ponderado(mm)	531.29	
Pendiente del cauce principal:	0,067	Moderada
Tc* (min):	54,3	Moderado
Población:	485,0	-
Disponibilidad de agua:	Alta	-

¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coefficiente de masividad,*Tiempo de concentración de Pizarro.

Cuenca Rodada

Se localiza hacia el oeste del Tancitaro y es de tamaño pequeño con solo 33 km². Su longitud del cauce principal es de 14.2 km y presenta un gradiente altitudinal pronunciado de más de 2000 m. Tiene un tiempo de concentración alto con más de una hora de tiempo. Con base en la interpretación de los diferentes índices, se puede establecer que esta cuenca tiene poca capacidad para captar agua. Lo anterior, a pesar de tener una red de drenaje bien estructurada (Cuadro 21, Figura 34). Esta cuenca no cuenta con escurrimientos permanentes, por lo que responde principalmente a los eventos de lluvia. La baja disponibilidad de agua está relacionada con las características anteriores y la existencia de manantiales y arroyos temporales muy pequeños que desaparecen inmediatamente después de las lluvias.

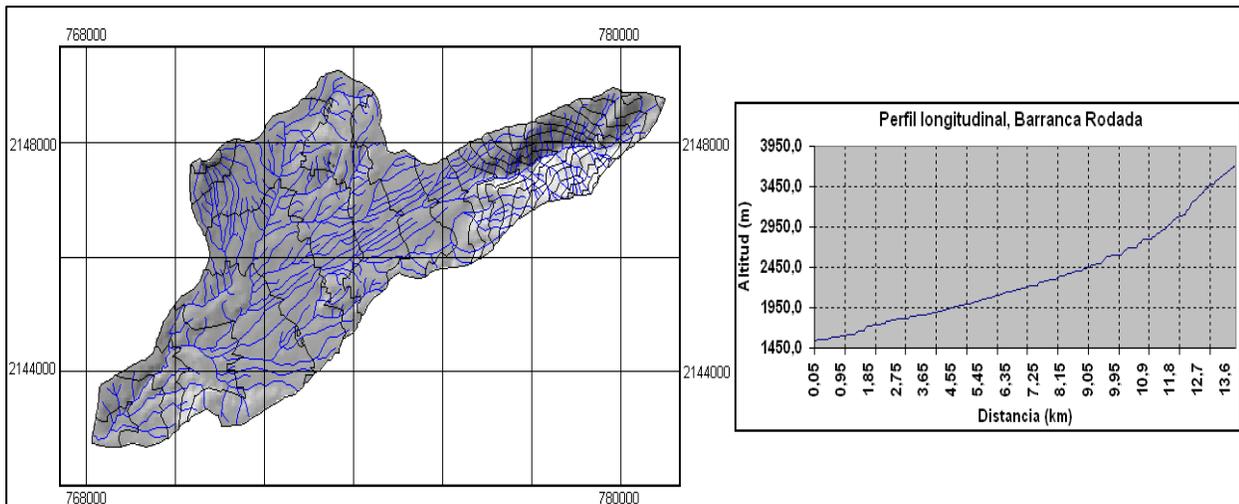


Figura 34. Cuenca y perfil longitudinal de Cuenca Rodada.

Cuadro 21. Características morfométricas de la Cuenca Rodada.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	34,3	-
Longitud del cauce principal (km):	14,2	Mediano
Ancho cuenca (km):	4,6	-
Elevación media (msnm):	2277,9	Moderada
Área (km ²):	33,84	Muy pequeña
Altitud mínima:	1540	
Altitud máxima:	3760	-
Desnivel:	2220	Alto
Kf ¹ :	0,17	Muy poco achatada
Kc ² :	1,7	De oval oblonga a rectangular oblonga
Li ³ :	3,1	Muy alargada
Km	67,3	Montañosa
Orden:	5	Alto
Densidad de drenaje (km/km ²):	5,4	Alta
Número de escurrimientos:	221,0	Medio
Escurrimiento anual ponderado(mm)	478.29	
Pendiente del cauce principal:	0,15	Fuerte
Tc* (min):	80,2	Moderado
Población (hab):	827,0	-
Disponibilidad de agua:	Baja	-

¹Coficiente de forma, ²Coficiente de compacidad, ³Indice de alargamiento, ⁴Coficiente de masividad
*Tiempo de concentración de Pizarro.

Cuenca Cutío

Esta cuenca se localiza al noroeste del Tancitaro y debe su nombre al de su río principal. Se trata de una cuenca de tamaño pequeño ya que tiene sólo 31.6 km² (Figura 35, Cuadro 22 a y b). Tanto el desnivel (1600 m) como la longitud de su cauce principal (11.8 km) son de cortas dimensiones. Esto

genera una menor variación de las condiciones ecológicas y de cobertura vegetal.

Los valores de su morfometría indican una baja pendiente, una red de drenaje bien estructurada y los valores en sus índices de compacidad, alargamiento y forma permiten suponer un comportamiento hidrológico similar a las de Chondo y Chuanito ya que junto con éstas cuencas, es una cuenca influenciada enormemente por la población de Peribán, a pesar de que dentro de sus límites la densidad de población es de menos de 50 hab/km². Lo anterior ha motivado la fuerte contaminación de su arroyo principal debido a descargas domésticas, pero también por agroquímicos por los retornos de aguas de las parcelas de maíz y huertas de aguacate.

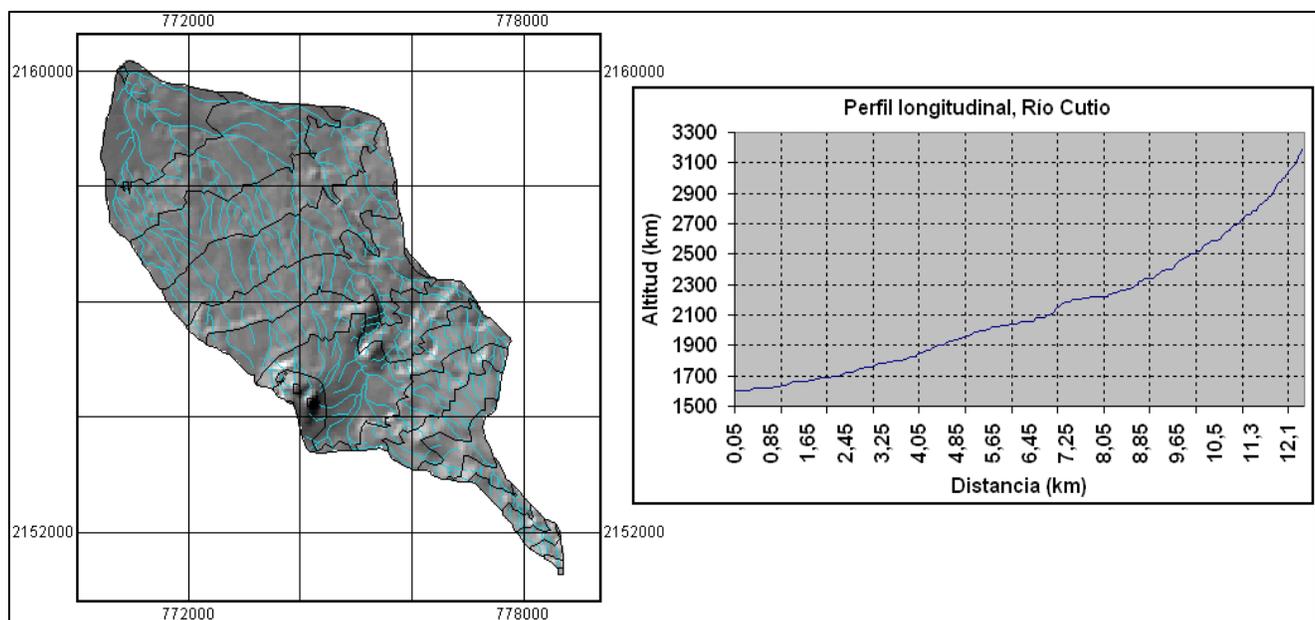


Figura 35. Cuenca y perfil longitudinal de Río Cutío.

Cuadro 22a. Características morfométricas de la cuenca Cutío.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	28,4	
Longitud del cauce principal (km):	11,8	Mediano
Ancho cuenca (km):	5,0	
Elevación media (msnm):	1892,1	Baja
Área (km ²):	31,67	Muy pequeña
Altitud mínima:	1600	
Altitud máxima:	3200	
Desnivel:	1600	Mediano
Kf ¹ :	0,23	Ligeramente achatada
Kc ² :	1,4	De oval redonda a oval oblonga
Li ³ :	2,4	Moderadamente alargada
Km	59.7	Montañosa

Cuadro 22b. Continuación. Características morfométricas de la cuenca Cutío.

Orden:	5	Alto
Densidad de drenaje (km/km ²):	4,8	Alta
Número de escurrimientos:	190,0	Medio
Escurrencimiento anual ponderado(mm)	540.14	
Pendiente del cauce principal:	0,13	Fuerte
Tc* (min):	60,4	Moderado
Población:	1429,0	-
Disponibilidad de agua:	Moderada	-

*Tiempo de concentración de Pizarro. ¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coefficiente de masividad

Cuenca El Chivo

La cuenca del arroyo El Chivo, se localiza hacia el sur del Pico de Tancitaro y es una de las dos cuencas más pequeñas de la zona de estudio (Figura 36, Cuadro 23). Su área es de 21.2 km² y el desnivel que presenta entre su máxima y mínima altitud es de solo 640 m y como se puede deducir, es una cuenca muy homogénea tanto climáticamente como en su cobertura vegetal. De forma más bien ovalada, es una cuenca con cauce principal corto y tiempo de concentración breve de 46 minutos. Los índices morfométricos indican la presencia de avenidas y por tanto capacidad para concentrar volúmenes de agua que se descargan con rapidez impidiendo la recarga.

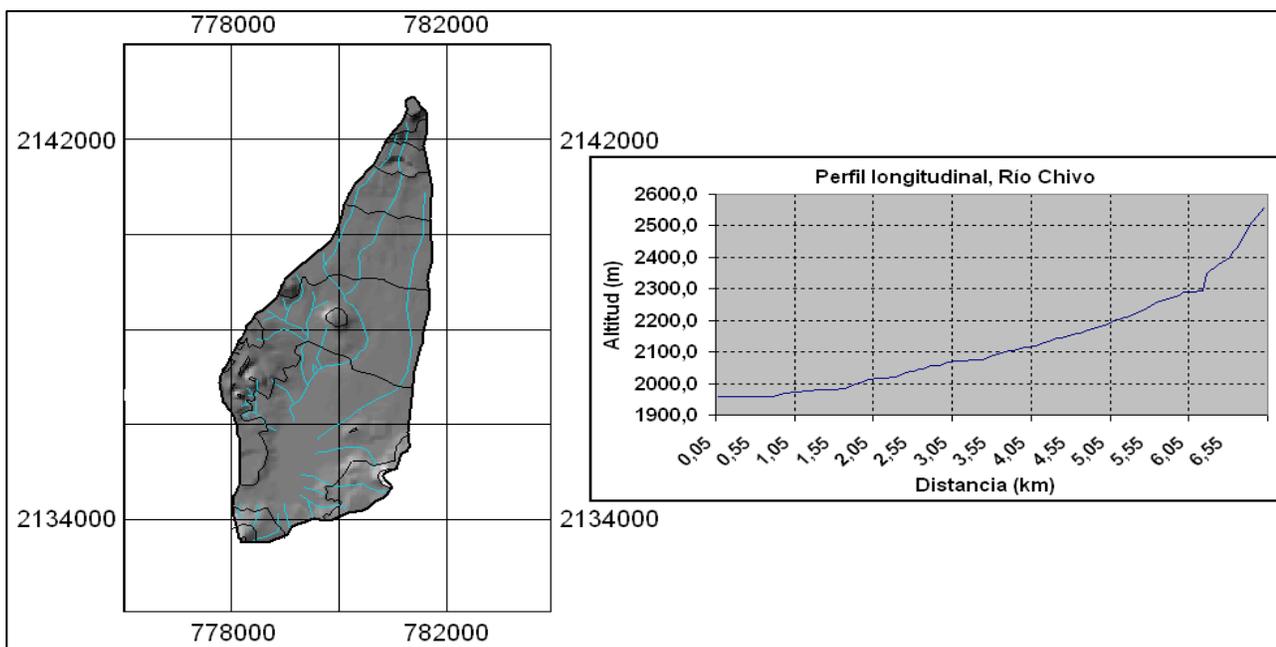


Figura 36. Cuenca y perfil longitudinal de Río Chivo.

Cuadro 23. Características morfométricas de la cuenca El Chivo.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	22,6	
Longitud del cauce principal (km):	9,9	Corto
Ancho cuenca (km):	3,8	
Elevación media (msnm):	2005,1	Baja
Área (km ²):	21,20	Muy pequeña
Altitud mínima:	1960	-
Altitud máxima:	2600	-
Desnivel:	640	Bajo
Kf ¹ :	0,22	Ligeramente achatada
Kc ² :	1,4	De oval redonda a oval oblonga
Li ³ :	2,6	Moderadamente alargada
Km	94.6	Moderadamente montañosa
Orden:	3	Medio
Densidad de drenaje (km/km ²):	1,8	Baja
Número de escurrimientos:	29,0	Bajo
Escorrimento anual ponderado(mm)	549.05	
Pendiente del cauce principal:	0,065	Moderada
Tc* (min):	46,0	Moderado
Población:	310,0	-
Disponibilidad de agua:	Baja	-

¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coefficiente de masividad *Tiempo de concentración de Pizarro.

Cuenca Hoyicazuela

La cuenca Hoyicazuela se encuentra hacia el oeste del Tancitaro y su nombre lo toma del río principal. Es una cuenca muy pequeña de 20.3 km². La diferencia de alturas entre la parte más baja y la más alta es de 1780 m (Figura 37 y Cuadro 24). Su desnivel es alto al registrar 1780 m, lo que nos indica una gran energía que facilita la presencia de crecidas durante la época de lluvias; sin embargo, por su forma más bien alargada y angosta, sus parámetros morfométricos indican baja tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua de escurrimiento. El escurrimiento de esta cuenca no es permanente, presentándose solo durante la época lluviosa y tan solo por cuatro meses en forma intermitente.

Lo anterior es posible corroborarlo al observar los valores de densidad de drenaje, el número de escurrimientos y el desnivel pronunciado de su relieve?. La disponibilidad de agua moderada en parte se debe a que la densidad poblacional no es alta, pero también a la existencia de manantiales.

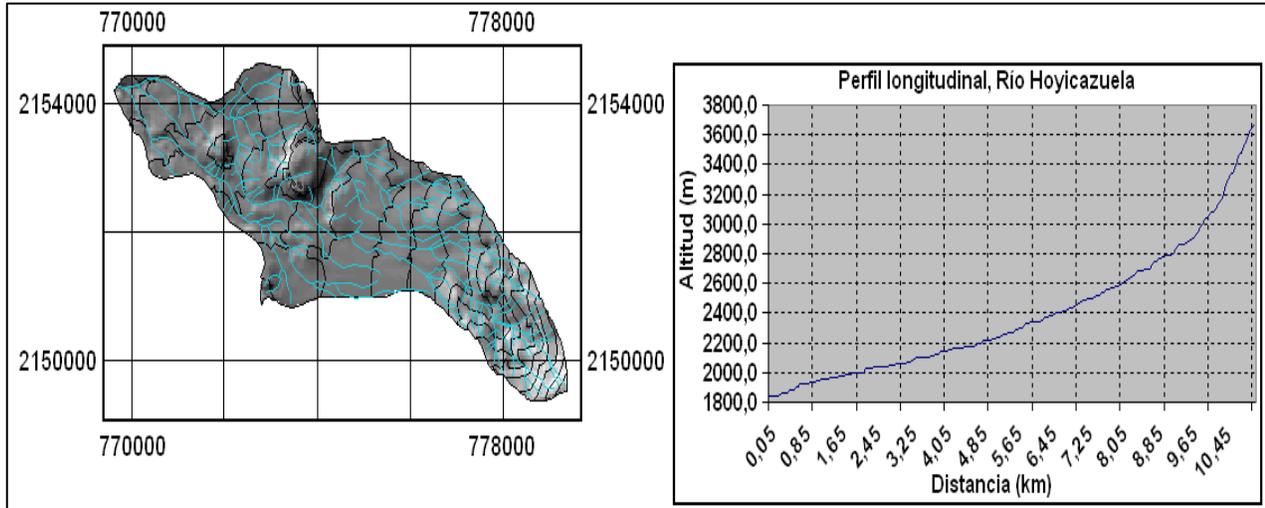


Figura 37. Cuenca y perfil longitudinal de Hoyicazuela.

Cuadro 24. Características morfométricas de la cuenca Hoyicazuela.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	25,6	-
Longitud del cauce principal (km):	10,7	Corto
Ancho cuenca (km):	2,9	-
Elevación media (msnm):	2421,3	Alta
Área (km ²):	20,33	Muy pequeña
Altitud mínima:	1820	-
Altitud máxima:	3600	-
Desnivel:	1780	Alto
Li ³ :	3,7	Muy alargada
Km	119.1	Moderadamente montañosa
Kf ¹ :	0,18	Muy poco achatada
Kc ² :	1,6	De oval oblonga a rectangular oblonga
Orden:	4	Medio
Densidad de drenaje (km/km ²):	4,9	Alta
Número de escurrimientos:	126,0	Bajo
Escurrecimiento anual ponderado(mm)	429.66	
Pendiente del cauce principal:	0,16	Fuerte
Tc* (min):	52,0	Moderado
Población:	124,0	
Disponibilidad de agua:	Moderada	

¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Indice de alargamiento, ⁴Coefficiente de pasividad, *Tiempo de concentración de Pizarro.

Cuenca Huandiestacato

La cuenca Huandiestacato debe su nombre al arroyo principal de la misma. Es una cuenca de tamaño medio y se localiza al norte-noreste del Pico de Tancitaro (Figura 38, Cuadro 25). Presenta una elevación media por arriba del promedio, por lo que es una cuenca más alta que la mayoría. Su desnivel

asciende a 1260 m, por lo que su pendiente no es muy pronunciada.

Una de las principales características de esta cuenca es su forma irregular. Es importante mencionar que esta cuenca junto con la de Nureto y Las Lavas del Paricutín definen en conjunto una cuenca muy grande.

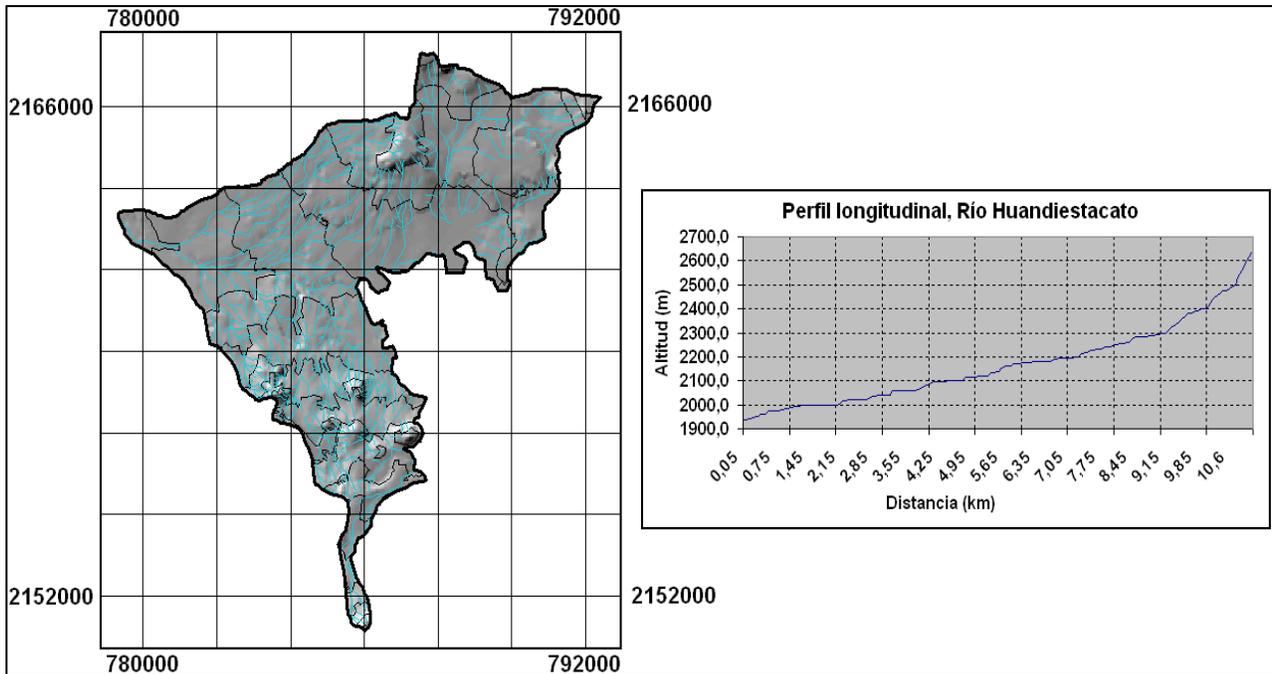


Figura 38. Cuenca y perfil longitudinal de Huandiestacato.

En general, Huandiestacato forma parte de las cuencas de tamaño medio, pero que por ser un poco alta, la variación climática y de la cobertura vegetal es menor a otras cuencas de menor tamaño (como Chondo, por ejemplo).

La morfometría de esta cuenca indica poca tendencia a la concentración de grandes volúmenes. Lo anterior debe verse con cuidado, pues el sustrato geológico de esta cuenca consiste en gran parte de lavas recientes y campos de cenizas y materiales volcánicos porosos, lo que ayuda a la rápida infiltración del escurrimiento. Quizá ello explique el hecho de encontrar justo en la salida de esta cuenca un manantial de más de 200 Lps. Dicha agua es aportada también por las Lavas del Paricutín cuya constitución rocosa no permite el escurrimiento.

Cuadro 25. Características morfométricas de la cuenca Huandiestacato.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	57,1	-
Longitud del cauce principal (km):	12,1	Mediano
Ancho cuenca (km):	5,5	-
Elevación media (msnm):	2339,5	Moderada
Área (km ²):	60,78	Mediana
Altitud mínima:	1940	-
Altitud máxima:	3200	-
Desnivel:	1260	Mediano
Kf ¹ :	0,42	Moderadamente achatada
Kc ² :	2,1	De oval oblonga a rectangular oblonga
I ³ :	2,18	Moderadamente alargada
Km	38.5	Montañosa
Orden:	5	Alto
Densidad de drenaje (km/km ²):	4,1	Alta
Número de escurrimientos:	318,0	Medio
Escurrimiento anual ponderado(mm)	514.81	
Pendiente del cauce principal:	0,10	Moderada
Tc* (min):	62,4	Moderado
Población:	6944,0	-
Disponibilidad de agua:	Alta	-

¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coefficiente de masividad.*Tiempo de concentración de Pizarro.

Cuenca La Culebra

Es una de las tres cuencas más importantes tanto en tamaño como en su aporte hídrico a la región (Figura 39, Cuadro 26). Su nombre lo toma de la barranca del mismo nombre donde escurre el cauce principal. Es además la cuenca de mayor tamaño del área de estudio con 102 km². Asimismo, posee una variación altitudinal 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.

Es una cuenca con forma redondeada, lo que permite una mayor captación de agua de escurrimiento lo que también es causa de que el arroyo principal sea permanente y tenga caudales superiores a los 250 Lps en la época de estiaje. La pendiente media del cauce es mayor que en la mayoría de las otras cuencas por lo que el nivel de energía es también mayor. A esta condición hay que agregar que es una cuenca cuya cabecera inicia prácticamente en lo más alto del Tancitaro y termina en lo más bajo. Es por ello, que la diferencia altitudinal de esta cuenca está entre las de mayor rango. Debido a lo anterior, se puede establecer que es una cuenca con alta disponibilidad de agua y por ello, se considera una cuenca prioritaria para implementar programas de manejo hídrico y conservación.

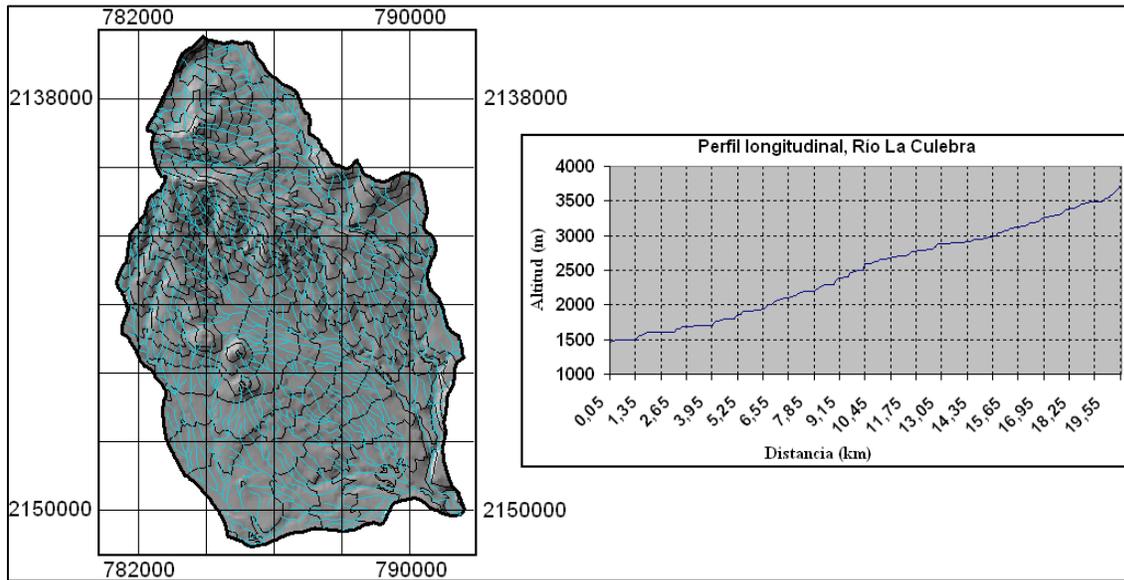


Figura 39. Cuenca y perfil longitudinal de La Culebra.

Cuadro 26. Características morfométricas de la cuenca La Culebra.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	45,0	-
Longitud del cauce principal (km):	15,9	Largo
Ancho cuenca (km):	9,8	-
Elevación media (msnm):	2453,6	Alta
Área (km ²):	102,66	Grande
Altitud mínima:	1500	-
Altitud máxima:	3760	-
Desnivel:	2260	Alto
Kf ¹ :	0,41	Moderadamente achatada
Kc ² :	1,2	Redonda a oval redonda
I ³ :	1,6	Moderadamente alargada
Km	23.9	Muy Montañosa
Orden:	6	Alto
Densidad de drenaje (km/km ²):	4,4	Baja
Número de escurrimientos:	510,0	Alto
Escorrimento anual ponderado(mm)	447.93	
Pendiente del cauce principal:	0,14	Fuerte
Tc* (min):	95,3	Lento
Población:	1930,0	-
Disponibilidad de agua:	Alta	-

¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coefficiente de masividad, *Tiempo de concentración de Pizarro.

Cuenca La Gringa

Esta cuenca se localiza al sur del Tancitaro y es junto con la del Chivo, la cuenca más pequeña del área de estudio. Toma su nombre del arroyo de su cauce principal. Su área es de 12.4 km² (Figura 40, Cuadros 27 a y b). Su forma es semejante a la cuenca El Chivo, es decir, más o menos oval pero

alargada. Su desnivel es de 660 m y su altitud máxima llega hasta los 2600 msnm lo que la ubica en la zona baja del Tancitaro. De la misma forma que la cuenca El Chivo, se ubica en la zona de piedemonte sobre estructuras volcánicas recientes, lo que no ha permitido la formación de una red de drenaje bien estructurada, por lo que su densidad de corrientes es baja

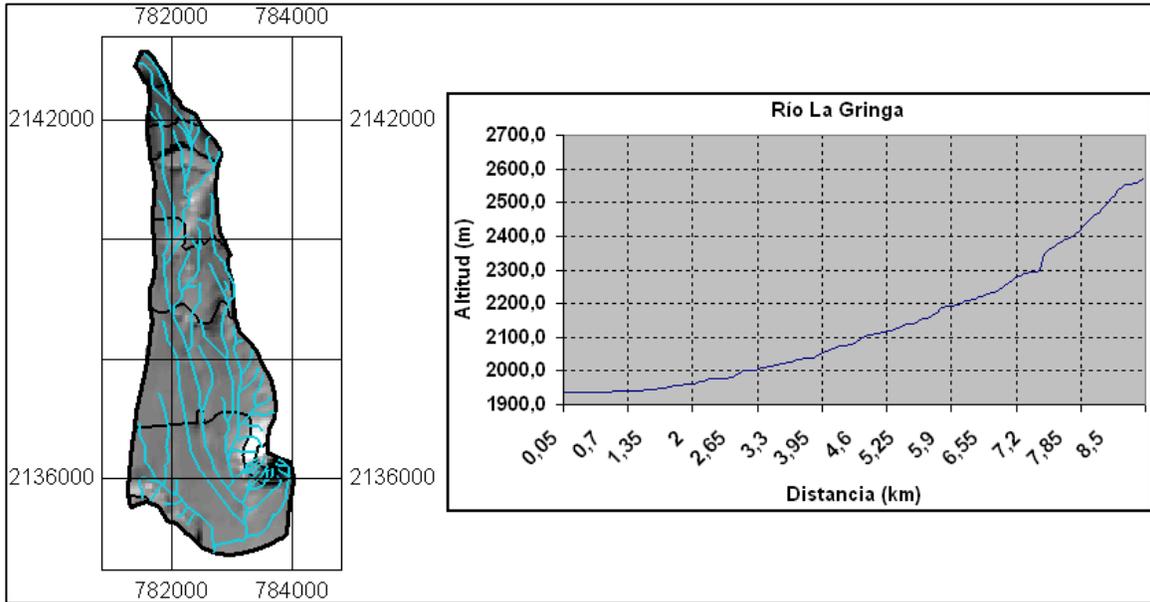


Figura 40. Cuenca y perfil longitudinal de La Gringa.

Cuadro 27. Características morfométricas de la cuenca La Gringa.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	20,0	-
Longitud del cauce principal (km):	8,5	Corto
Ancho cuenca (km):	2,8	-
Elevación media (msnm):	2084,4	Moderada
Área (km ²):	12,48	Muy pequeña
Altitud mínima:	1940	-
Altitud máxima:	2600	-
Desnivel:	660	Bajo
K ^f :	0,17	Muy poco achatada
K _c ² :	1,6	De oval oblonga a rectangular oblonga
I ³ :	3	Muy alargada
K _m	167	Moderadamente montañosa
Orden:	4	Medio
Densidad de drenaje (km/km ²):	3,7	Alta
Número de escurrimientos:	54,0	Bajo
Escurrencimiento anual ponderado(mm)	527.06	
Pendiente del cauce principal:	0,07	Moderada
T _c * (min):	36,5	Rápido
Población:	1533,0	-
Disponibilidad de agua:	Baja	-

¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coefficiente de masividad, *Tiempo de concentración de Pizarro.

Estas condiciones no permiten una gran captación de agua a pesar de que los coeficientes de compacidad y el de forma indicarían lo contrario. Otro factor que reduce el escurrimiento superficial es el sustrato volcánico reciente que facilita la infiltración. Debido a todo lo anterior y a que no existen fuentes de agua importantes y si en cambio una densidad poblacional alta, la disponibilidad de agua es baja en esta cuenca.

Unidad hidrológica Lavas del Paricutín

Esta unidad se localiza al noreste del Tancitaro y su nombre lo toma de la formación geológica del volcán Paricutín. En este caso, no existe un cauce principal ni tiempo de concentración. Esto se debe a que como se aprecia en la tabla correspondiente, no existen escurrimientos debido a la naturaleza del sustrato geológico, conformado por un campo de lavas muy recientes de tipo basáltico, el cual determina su comportamiento hidrológico definido por la evaporación y la infiltración. (Figura 41, Cuadro 28,). Debido a lo anterior, su importancia es mayúscula desde el punto de vista hidrológico porque constituye una zona importantísima de recarga de acuíferos del Tancitaro.

Esta unidad hidrológica ha sido llamada así debido a que no constituye una cuenca en el sentido hidrográfico. Como ya se mencionó, forma parte de una cuenca mayor en conjunto con las cuencas (subcuenas) de Huandiestacato y Nureto. Sin embargo su inclusión altera sustancialmente los parámetros morfométricos haciendo poco lógica su comparación con las demás cuencas.

En este caso, se muestra solo de manera ilustrativa el cuadro de valores morfométricos y solo se hace hincapié en aquellos que tienen relevancia para el análisis y en cambio se mencionan aquellos elementos que hacen de las lavas del Paricutín una unidad hidrológica especial.

En cuanto a los otros parámetros hablamos de una unidad de elevación media con valores altos pero con poca variación altitudinal. Su tamaño la ubica en una de tipo muy pequeño. En esta unidad no existe ningún tipo de asentamiento humano.

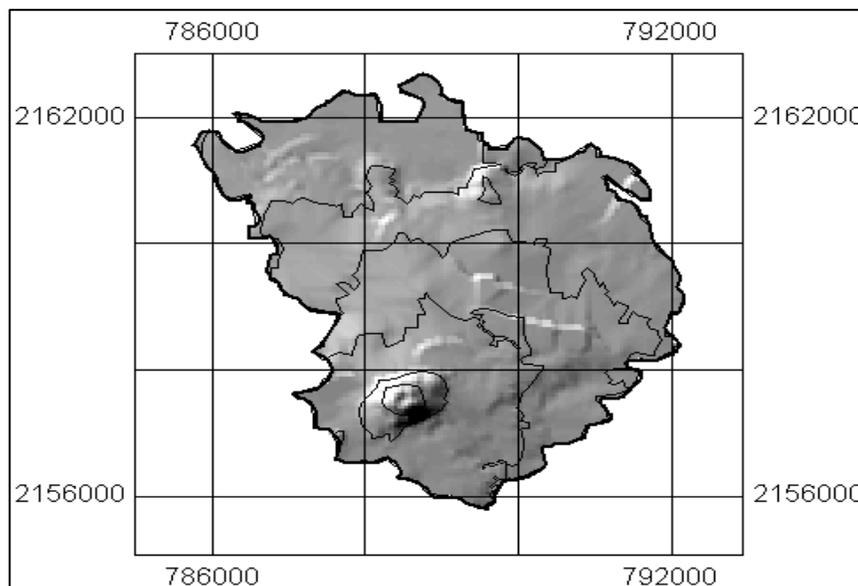


Figura 41. Cuenca y perfil longitudinal de las Lavas del Paricutín.

Cuadro 28. Características morfométricas de la unidad hidrológica Lavas del Paricutín

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	30,1	-
Elevación media (msnm):	2410,6	Alta
Área (km ²):	25,51	Muy Pequeña
Altitud mínima:	2200	-
Altitud máxima:	2800	-
Desnivel:	600	Bajo
Km	94.5	Moderadamente montañosa
Orden:	0	Nulo
Densidad de drenaje (km/km ²):	0,4	Baja
Número de escurrimientos:	0,0	Nulo
Escurrimiento anual ponderado(mm)	458.21	
Población:	0,0	-
Disponibilidad de agua:	Sin disponibilidad	-

¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coefficiente de masividad, ^{*}Tiempo de concentración de Pizarro.

Cuenca Nureto

La cuenca Nureto se localiza al noroeste del Pico de Tancitaro. Es una de las cuencas más grandes del área de estudio. Sin embargo, su característica principal radica en su forma, su red hidrológica y el sustrato sobre el que se asienta (Figura 42, Cuadro 29).

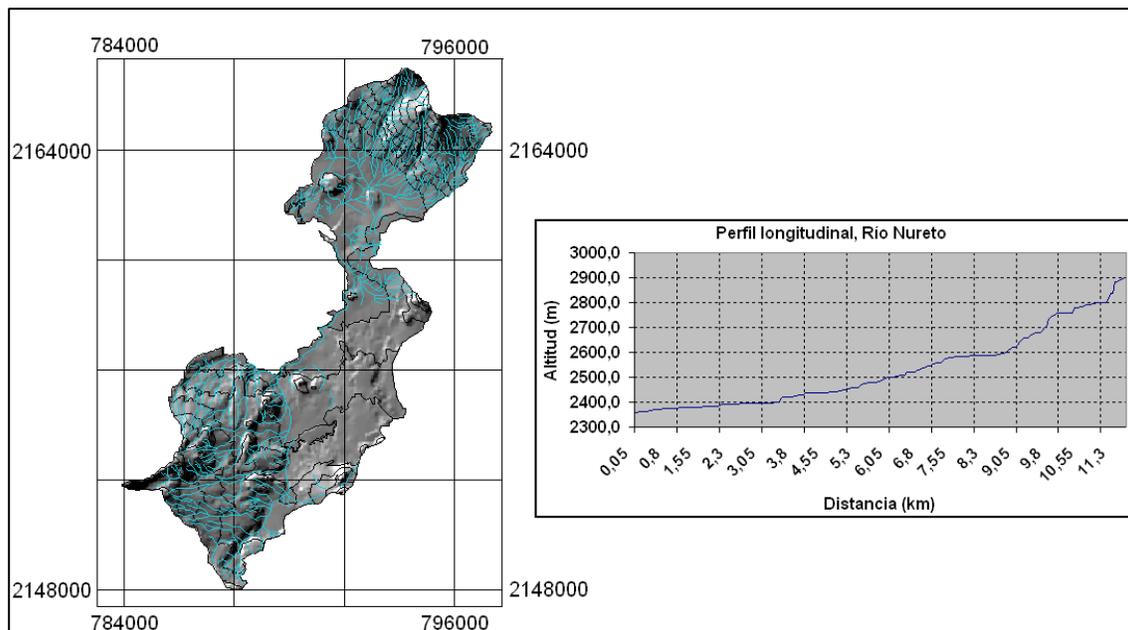


Figura 42. Cuenca y perfil longitudinal de Nureto.

Nureto tiene una forma alargada que le imprime una característica distinta a las demás y que se refleja en sus parámetros morfométricos. Por ejemplo, el índice de forma es menor a la unidad y por tanto la

posibilidad de concentración del agua es menor. Esto sugiere que su cauce principal no presenta en campo gastos importantes, es decir, que no se desarrollan grandes crecidas.

El índice de compacidad confirma lo anterior al presentarse un valor alto para K_c (1.7).

Además, el índice de alargamiento es mayor a 1, lo que confirma las características anteriores. Por otro lado, la densidad de drenaje, el número de escurrimientos y el orden de corriente presentan elementos distintos a la mayoría de las cuencas. Su densidad es menor lo mismo que los otros dos parámetros y esto se debe a que la cuenca se encuentra en un sustrato reciente formado por lavas muy jóvenes y depósitos de cenizas provenientes del Parícutín. Esta condición se presenta sobre todo al centro de la cuenca donde prácticamente no existen los escurrimientos y por tanto la densidad de corrientes tiende a cero. Esto es muy importante hidrológicamente hablando, pues significa que en esta cuenca dominan los procesos de infiltración y evaporación.

Cuadro 29. Características morfométricas de la cuenca Nureto.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	67,9	-
Longitud del cauce principal (km):	18,9	Largo
Ancho cuenca (km):	7,3	-
Elevación media (msnm):	2652,2	Alta
Área (km ²):	84,76	Grande
Altitud mínima:	2300	-
Altitud máxima:	3500	-
Desnivel:	1200	Bajo
K_f^1 :	0,24	Ligeramente achatada
K_c^2 :	1,7	De oval oblonga a rectangular oblonga
I^3 :	1,3	Poco alargada
Coefficiente de masividad K_m	31.3	Muy Montañosa
Orden:	6	Alto
Densidad de drenaje (km/km ²):	3,7	Alta
Número de escurrimientos:	366,0	Alto
Escurrimiento anual ponderado(mm)	467.59	
Pendiente del cauce principal:	0,06	Moderada
T_c^* (min):	125,1	Lento
Población:	0,0	-
Disponibilidad de agua:	Baja	-

¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coefficiente de masividad, ^{*}Tiempo de concentración de Pizarro.

Cuenca San Francisco

La cuenca San Francisco se ubica hacia el norte del Pico de Tancitaro. Es una cuenca de tamaño pequeño con 41.8 km² y un cauce principal de 14 km de largo. Sus características morfométricas

indican una forma alargada y poco achatada (Cuadro 30a y 30b, Figura 43). Con respecto a las demás cuencas su elevación es mayor, lo que indica una mayor superficie en zonas altas. Esto se verifica al observar el índice de masividad que la ubica como “montañosa”.

Cuadro 30. Características morfométricas de la cuenca San Francisco.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	34,8	-
Longitud del cauce principal (km):	14,1	Mediano
Ancho cuenca (km):	4,5	-
Elevación media (msnm):	2473,5	Alta
Área (km ²):	41,80	Pequeña
Altitud mínima:	1800	-
Altitud máxima:	3600	-
Desnivel:	1800	Mediano
Kf ¹ :	0,21	Ligeramente achatada
Kc ² :	1,5	De oval oblonga a rectangular oblonga
I ³ :	3,1	Muy alargada
Km	59.2	Montañosa
Orden:	5	Alto
Densidad de drenaje (km/km ²):	4,7	Alta
Número de escurrimientos:	260,0	Medio
Escurrimiento anual ponderado(mm)	366.55	
Pendiente del cauce principal:	0,12	Fuerte
Tc* (min):	79,0	Moderado
Población:	1542,0	-
Disponibilidad de agua:	Moderada	-

¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coefficiente de pasividad, *Tiempo de concentración de Pizarro.

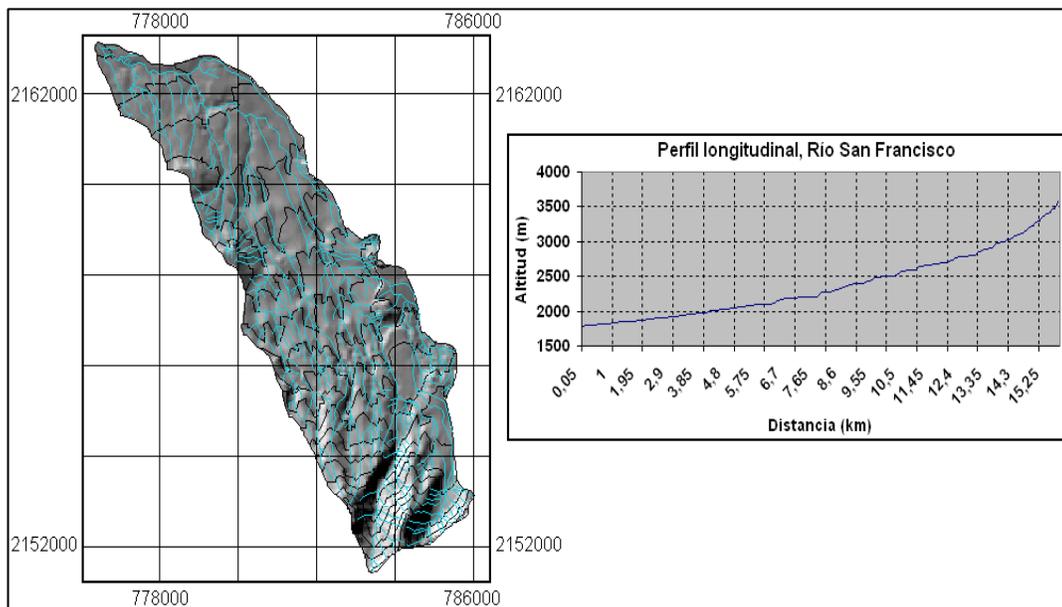


Figura 43. Cuenca y perfil longitudinal de San Francisco.

Esta cuenca tiene una gran importancia hidrológica pues es una de las pocas que tienen cauce permanente. Los parámetros de densidad de drenaje, orden de corriente y número de escurrimientos así lo indican pues son sensiblemente más altos que la mayoría de las cuencas.

Por otro lado, la pendiente media de su cauce también es alta lo que ayuda a concentrar volúmenes mayores de agua en menor tiempo.

San Francisco por tanto, presenta una mayor actividad de escurrimiento superficial.

Cuenca Tancítaro

La cuenca de Tancítaro es una de las cuencas más importantes del Pico de Tancítaro debido a que en ella se localiza la población de Tancítaro y cabecera municipal. Se localiza al oeste-suroeste del Pico y tiene un tamaño medio con 66.07 km² (Figura 44, Cuadro 31 a y 31 b).

Asimismo, 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.

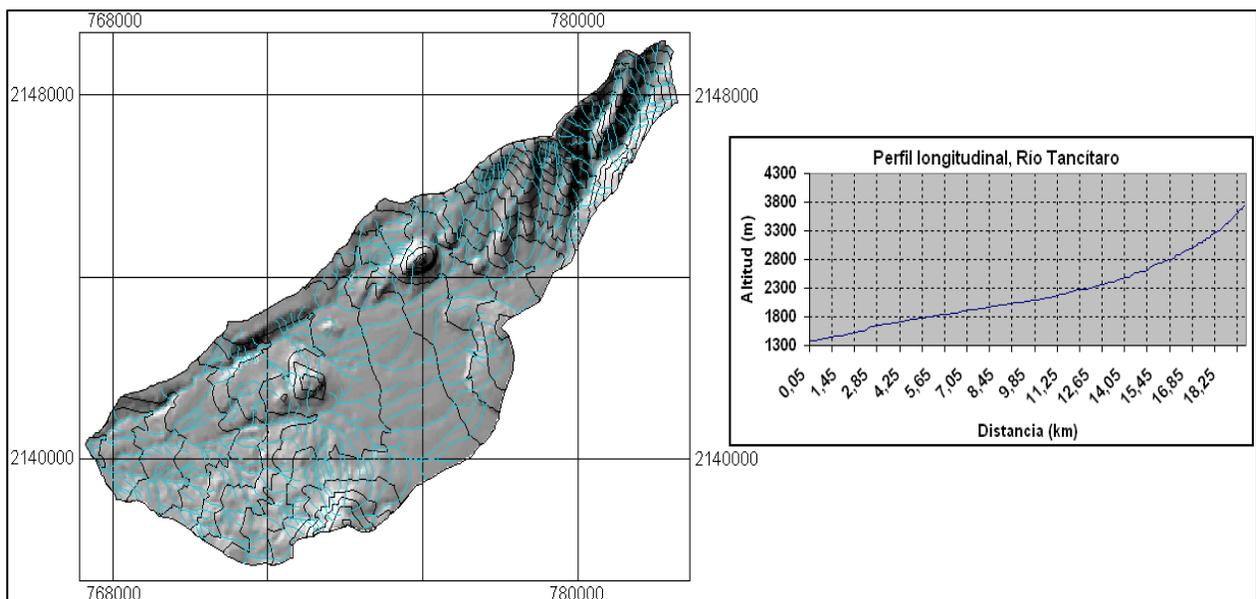


Figura 44. Cuenca y perfil longitudinal de Tancítaro.

Por tanto, esta cuenca debe ser tratada como una de escurrimiento permanente al observar sus parámetros morfométricos.

Cuadro 31. Características morfométricas de la cuenca Tancitaro.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	42,3	-
Longitud del cauce principal (km):	17,4	Largo
Ancho cuenca (km):	5,9	-
Elevación media (msnm):	2189,5	Moderada
Área (km ²):	66,07	Mediana
Altitud mínima:	1380	-
Altitud máxima:	3840	-
Desnivel:	2460	Alto
K ^f :	0,22	Ligeramente achatada
K _c ² :	1,5	De oval redonda a oval oblonga
I ³ :	2.95	Muy alargada
K _m	33.1	Muy Montañosa
Orden:	6	Alto
Densidad de drenaje (km/km ²):	4,2	Alta
Número de escurrimientos:	337,0	Medio
Escurrencimiento anual ponderado(mm)	492.79	
Pendiente del cauce principal:	0,14	Fuerte
T _c * (min):	109,7	Lento
Población:	9713,0	-
Disponibilidad de agua:	Moderada	-

¹Coefficiente de forma, ²Coefficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coefficiente de masividad,*Tiempo de concentración de Pizarro.

La cuenca presenta un cauce largo y un área de tamaño mediano, su diferencia altitudinal pronunciada y su coeficiente de masividad bajo, indican la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua y los parámetros de la red fluvial tales como el número de escurrimientos, el orden de corrientes y la densidad de drenaje así lo confirman, pues sus valores son altos en general. Lo mismo se puede apreciar con el valor de la pendiente del cauce principal.

Respecto al tiempo de concentración se observa un tiempo mayor entre la ocurrencia de la lluvia y la presencia de las crecidas. Esto indica nuevamente la capacidad de la cuenca para servir como cuenca de escurrimiento.

Finalmente, en la relación agua-población, resulta una disponibilidad moderada de agua. Lo anterior debe poner en alerta el manejo del agua pues pronto podría rebasarse este nivel y ubicar la cuenca en una categoría con baja disponibilidad de agua superficial.

Cuenca Zacándaro

Zacándaro es una cuenca que se localiza al sureste del Tancitaro. Su tamaño más bien pequeño destaca por la cantidad de agua que produce y por tener en consecuencia un escurrimiento permanente.

Las características morfométricas de la red fluvial y sus indicadores de forma y altitudinales presentan similitud con la cuenca de La Culebra.

Dichos parámetros indican una cuenca montañosa y moderadamente alargada pero con gran número de escurrimientos, y orden y densidad de corrientes con valores altos (Figura 45, Cuadro 32).

Además, los valores de forma, compacidad y alargamiento indican también tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua.

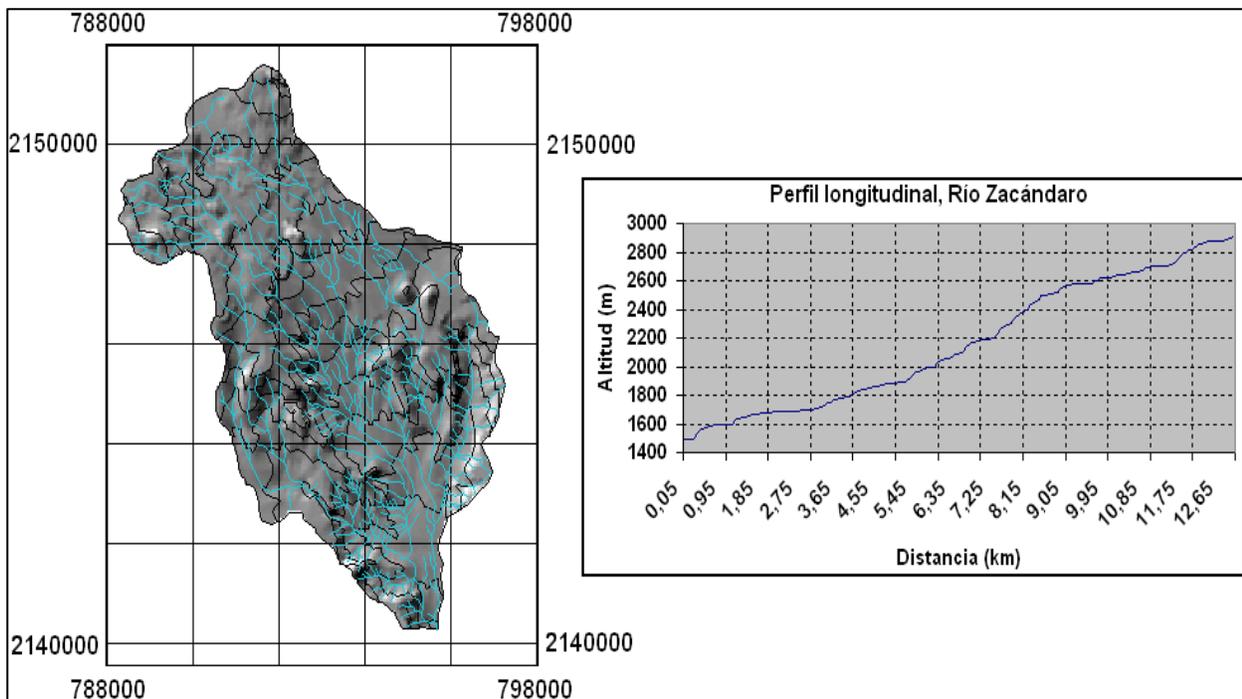


Figura 45. Cuenca y perfil longitudinal de Zacándaro.

Es obvio asimismo, que la localización de la cuenca en la zona más lluviosa del Tancitaro facilita la disponibilidad de agua. Pero sus parámetros también lo permiten de esta manera.

Cuadro 32. Características morfométricas de la cuenca Zacándaro

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	34,8	-
Longitud del cauce principal (km):	12,0	Mediano
Ancho cuenca (km):	6,5	-
Elevación media (msnm):	2224,0	Moderada
Área (km ²):	51,16	Pequeña
Altitud mínima:	1500	-
Altitud máxima:	3040	-
Desnivel:	1540	Mediano
Kf ¹ :	0,36	Moderadamente achatada
Kc ² :	1,4	De oval redonda a oval oblonga
I ³ :	1,83	Moderadamente alargada
Km	43.5	Montañosa
Orden:	5	Alto
Densidad de drenaje (km/km ²):	3,9	Alta
Número de escurrimientos:	368,0	Alto
Escurrimiento anual ponderado(mm)	566.65	
Pendiente del cauce principal:	0,13	Fuerte
Tc* (min):	61,8	Moderado
Población:	1021,0	-
Disponibilidad de agua:	Alta	-

¹Coficiente de forma, ²Coficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coficiente de masividad, *Tiempo de concentración de Pizarro.

Finalmente, debido a lo anterior y a una buena relación población-cantidad de agua, la disponibilidad de agua de esta cuenca es alta.

Cuenca Zirimóndiro

Esta última cuenca, se localiza al sur del Pico de Tancítaro. Es una cuenca muy pequeña con menos de 30 km² y presenta un cauce principal mediano con poco más de 14 km de largo (Figura 46); es una cuenca con parámetros morfométricos moderados, sin grandes variaciones y alejados de los promedios (Cuadro 33).

La elevación media es moderada con 2266 msnm lo que indica cierto balance altitudinal. Debido a que su variación altitudinal no es pronunciada, la cuenca no presenta grandes variaciones climáticas ni en su cobertura vegetal.

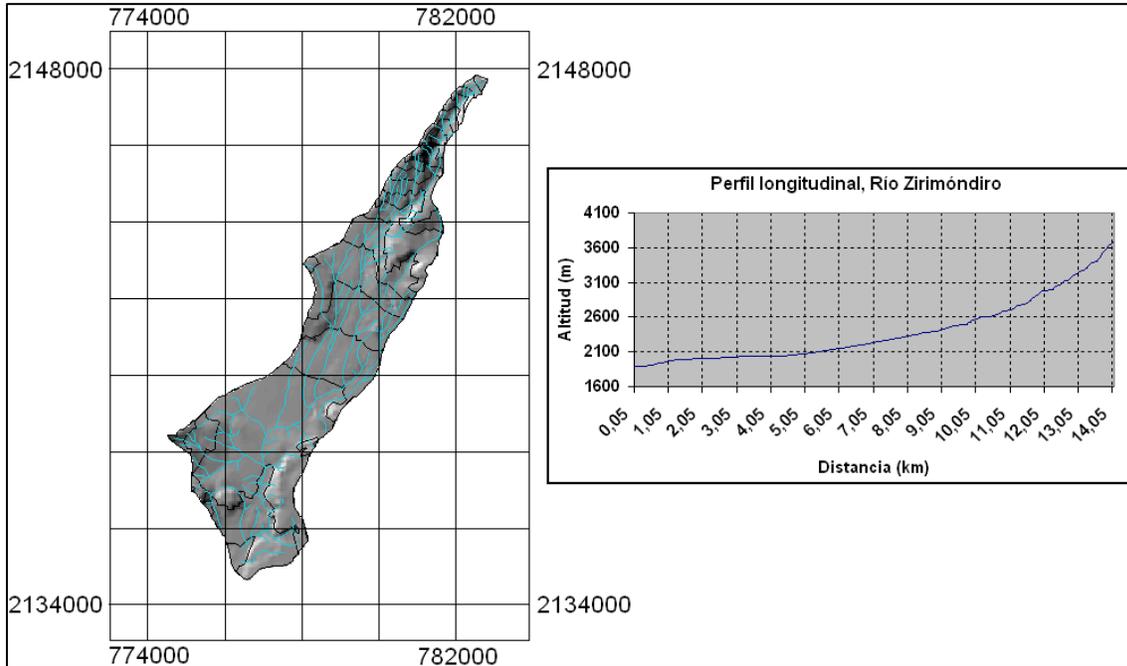


Figura 46 Cuenca y perfil longitudinal de Zirimóndiro.

Presenta una forma de tipo alargada, poco achatada y circularidad menor, con un coeficiente de masividad alto lo que produce una cuenca oblonga y moderadamente montañosa, sin mucha capacidad para concentrar el agua de escurrimiento.

La cuenca no presenta un escurrimiento permanente a lo largo de su cauce principal, aunque si presenta escurrimiento permanente en su salida debido a que coincide con la presencia de un manantial de regular volumen.

En cuanto a los valores relacionados con la red fluvial. Todo indica la tendencia a una baja capacidad de concentración de aguas de escurrimiento.

Ello se observa por el desarrollo de una red de drenaje de bajo orden y un número bajo de escurrimientos naturales. En cuanto a la densidad de drenaje, ésta presenta valores moderados.

La relación agua-población es moderada, debido sobre todo a la presencia del manantial mencionado y a la cantidad menor de población dentro de la cuenca.

Cuadro 33. Características morfométricas de la cuenca Zirimóndiro.

Parámetro	Magnitud	Clasificación
Perímetro (km):	34,4	-
Longitud del cauce principal (km):	14,3	Mediano
Ancho cuenca (km):	3,5	-
Elevación media (msnm):	2266,8	Moderada
Área (km ²):	28,81	Muy pequeña
Altitud mínima:	1900	-
Altitud máxima:	3700	-
Desnivel:	1800	Mediano
Kf ¹ :	0,14	Muy poco achatada
Kc ² :	1,8	De oval oblonga a rectangular oblonga
I ³ :	4,1	Muy alargada
Km	78.7	Moderadamente montañosa
Orden:	4	Medio
Densidad de drenaje (km/km ²):	3,4	Moderada
Número de escurrimientos:	104,0	Bajo
Escurrimiento anual ponderado(mm)	447.66	
Pendiente del cauce principal:	0,12	Fuerte
Tc* (min):	81,5	Moderado
Población:	855,0	-
Disponibilidad de agua:	Moderada	-

¹Coficiente de forma, ²Coficiente de compacidad, ³Índice de alargamiento, ⁴Coficiente de masividad, *Tiempo de concentración de Pizarro.

Balance hídrico comparado

El balance hídrico del Pico de Tancitaro y sus cuencas presenta una situación normal –o esperada– respecto a la que debería presentarse en su comportamiento. Es decir, durante el año, hay meses con excedentes de agua y meses –la mayoría– con déficit de agua. En este mismo sentido, los datos son comparables con el comportamiento hídrico de la mayor parte del país.

Parte del análisis que aquí se presenta fue publicado en la revista electrónica indexada Journal of Environmental Hydrology en el año 2004 (Fuentes *et. al.*, 2004) y otra parte, correspondiente a la comparación de balances hídricos entre 1996 y 2003, fue elaborada posteriormente para este escrito.

Balance Hídrico Anual

Los mapas de déficit y excedencia de agua mensuales fueron sumados para generar los mapas anuales de excedente y déficit. Estos mapas fueron reclasificados posteriormente en valores de clase (alfanuméricos) tomando como criterio una clasificación estadística de éstos en rangos partiendo de los valores máximos y mínimos, calificándose el excedente de agua con 6 clases: Sin excedente, Muy bajo, Bajo, Moderado Moderadamente alto y Alto. Mientras que en el caso del déficit se obtuvieron 5 clases: Muy bajo, Bajo, Moderado, Alto y Muy alto (Cuadro 34). Los rangos mencionados son relativos al

Tancítaro exclusivamente ya que desde el punto de vista climático la región, como ya se mencionó en el capítulo 1 tiene climas con lluvias en verano que van desde húmedos hasta subhúmedos lo que indica en general zonas deficitarias de agua para los primeros seis meses del año.

Cuadro 34. Clases de excedente y déficit de agua para reclasificación de los mapas de valores respectivos.

Excedente de agua		Déficit de agua	
Rango (mm)	Clases	Rango (mm)	Clases
0	Sin excedente	0-300	Muy bajo
0-70	Muy bajo	300-600	Bajo
70-140	Bajo	600-900	Moderado
140-210	Moderado	900-1200	Alto
210-280	Moderadamente alto	1200-1500	Muy alto
280-350	Alto		

Distribución espacial del déficit y del excedente de agua.

Desde el punto de vista de la distribución espacial del déficit, tanto en la cima del Pico de Tancítaro como en el Cerro Prieto y los cerros de Angahuan (aunque éstos últimos en mucho menor cuantía), el déficit hídrico es menos notorio. En todas estas áreas geográficas los valores de déficit son bajos o tienen valor 0 predominantemente, formando “islas” con mayor riqueza hídrica.

Por el contrario, la zona de mayor utilización de agua, es decir, en las partes bajas al pié del Tancítaro, presentan valores altos de déficit que se mantienen durante el año afectando negativamente el balance hídrico de la región e indicando con ello, mayores necesidades de agua.

La distribución espacial de excedencia de agua, indica que tanto el Cerro Prieto localizado al este del Pico de Tancítaro, como las laderas superiores de éste último, constituyen las áreas geográficas con mayor excedente. Lo anterior, como resultado de las condiciones particulares de la cobertura vegetal (más de 80%) y de los suelos formados de cenizas volcánicas que tienen los dos macizos volcánicos permitiendo un mayor almacenamiento.

Déficit y excedente de agua anual.

El mapa de déficit de agua anual tiene, como primer característica, el predominio de valores altos y muy altos (entre 950 y 1461 mm año⁻¹); valores que se distribuyen desde las partes bajas del Tancítaro a la zona de piedemonte alto y bajo. La distribución altitudinal va desde los 1300 msnm hasta los 2650

msnm. En cuanto a los valores moderados y bajos éstos se distribuyen regularmente hacia la cima del macizo volcánico. Esta distribución radial del déficit se debe a diversos factores como la cobertura vegetal ascendentemente más densa, a la altitud que proporciona niveles de evapotranspiración inversos a dicho factor y el grado de naturalidad de los paisajes inverso al déficit de agua.

Respecto al excedente anual, éste presenta características particulares. Aunque podemos decir que tiene un comportamiento radial y que sigue un sentido paralelo a la altitud, en realidad el excedente “bajo” predomina ampliamente (rango de 0 a 350 mm anuales). Esto se debe a que la cobertura de aguacate se extiende por todo el piedemonte del Tancitaro demandando una gran cantidad de agua, condición que va disminuyendo con la presencia de bosques abiertos y cerrados ubicados a altitudes mayores a 2500 msnm y hasta los 3200 msnm. En toda esta franja el excedente aumenta donde se aprecia una nueva disminución con la presencia del bosque abierto de *Pinus hartwegii*, entre los 3200 msnm y la cima, localizada a 3840 msnm.

Comparación del balance hídrico superficial estimado de los años 1996 y 2003.

Dado que el estudio presentado corresponde a la cobertura del año 1996, se decidió efectuar el ejercicio de estimación del balance hídrico para la cobertura del año 2003 y así, comparar los dos balances para saber como se comporta. Esto permitió contestar interrogantes como ¿el balance hídrico es más o menos deficitario que antes?, ¿existe algún cambio? sobre la oferta y demanda de agua actual con respecto a la de años anteriores?

Para poder comparar los valores entre mapas se reclasificaron los valores en cinco clases estadísticas a partir de los valores máximos y mínimos presentes en cada mapa. De esta forma y considerando que las variaciones en la lámina del escurrimiento (mm) no son muy grandes, se consideró que los valores eran comparables entre mapas.

Excedente de agua

El análisis del excedente de agua de 1996 presenta modificaciones importantes respecto al del 2003 (Figura 47). En principio, se puede observar que en 1996 existían áreas –aunque insignificantes- con algún grado de excedente relativamente alto (0.003% de la superficie en estudio).

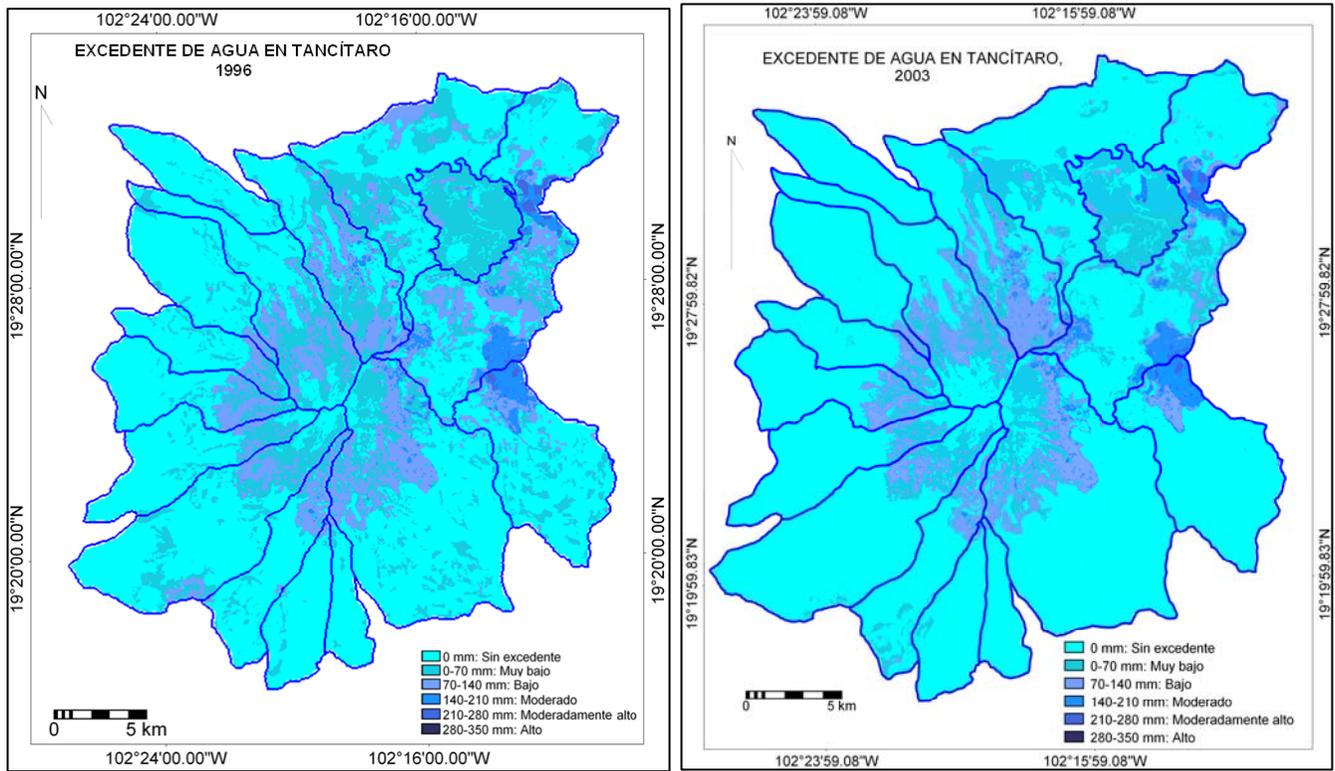


Figura 47. Excedente de agua en el Tancitaro para los años 1996 y 2003.

Fuente: Estimación propia.

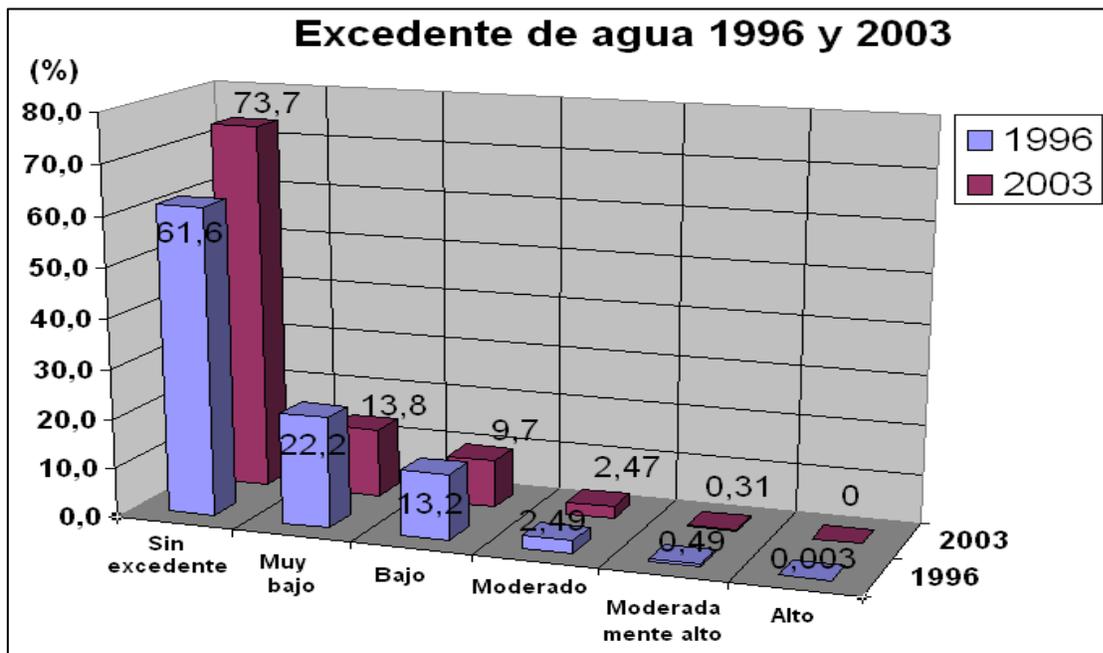


Figura 48. Comparación de la superficie con excedentes de agua entre 1996 y 2003. Valores en porcentaje de superficie.

Fuente: Estimación propia.

Para 2003 desaparece dicha categoría. Asimismo, la categoría de “sin excedente”, sube 12.1 puntos porcentuales con respecto al año 96 ubicándose en 73.7 %. Las restantes categorías también cambian como puede observarse en la Figura 48. Las categorías de “Moderadamente alto” y “Moderado” sufren disminuciones respectivamente de 0.18% y 0.02%; lo mismo con la categoría de “Bajo”, que disminuye 3.5% y la de “Muy Bajo” 8.4%. En otras palabras, el balance hídrico tiende hacia la condición de déficit.

Vale la pena aclarar que en este ejercicio se utilizaron las mismas herramientas y que únicamente cambió la variable de la cobertura. Eso quiere decir que la pérdida de bosque evidentemente contribuye a una menor oferta de agua. En la mayoría de estudios se ha documentado que si hay pérdida del bosque se aumenta la oferta de agua. En este caso ocurre lo contrario porque una parte importante de la pérdida del bosque ha sido para establecer aguacate, el cual tiene una ETP mayor, y por ello se reduce el escurrimiento (Bravo-Espinosa et al., 2009).

Déficit de agua

El déficit de agua refleja entre otras cosas, el grado de estrés hídrico que deben soportar las plantas (Beek, 1996). Asimismo, el déficit de agua refleja a nuestro parecer, el grado de deterioro de la cobertura vegetal pues un mayor déficit conduce a un menor desarrollo de las plantas o bien, expresa la sustitución de coberturas originales por antrópicas (cultivos y sistemas urbanos y rurales). En el caso del déficit de agua se observan cambios mucho menos drásticos (Figura 50). Las categorías de 1996 que aumentan para 2003 son las clases de “muy bajo” con 0.01 %, “bajo” con 0.36%, “alto” con 1.24% y “muy alto” con 0.83%. La única clase que disminuye es la de “moderado” con un 2.44%.

Si consideramos que la cobertura de bosque ha venido perdiendo terreno y que la de aguacate lo ha ido ganando, entonces es posible entender el porque el excedente de agua se ve afectado mientras el déficit prácticamente se mantiene como se mencionó anteriormente. La Figura 49 compara los mapas de déficit para los dos años analizados (1996 y 2003).

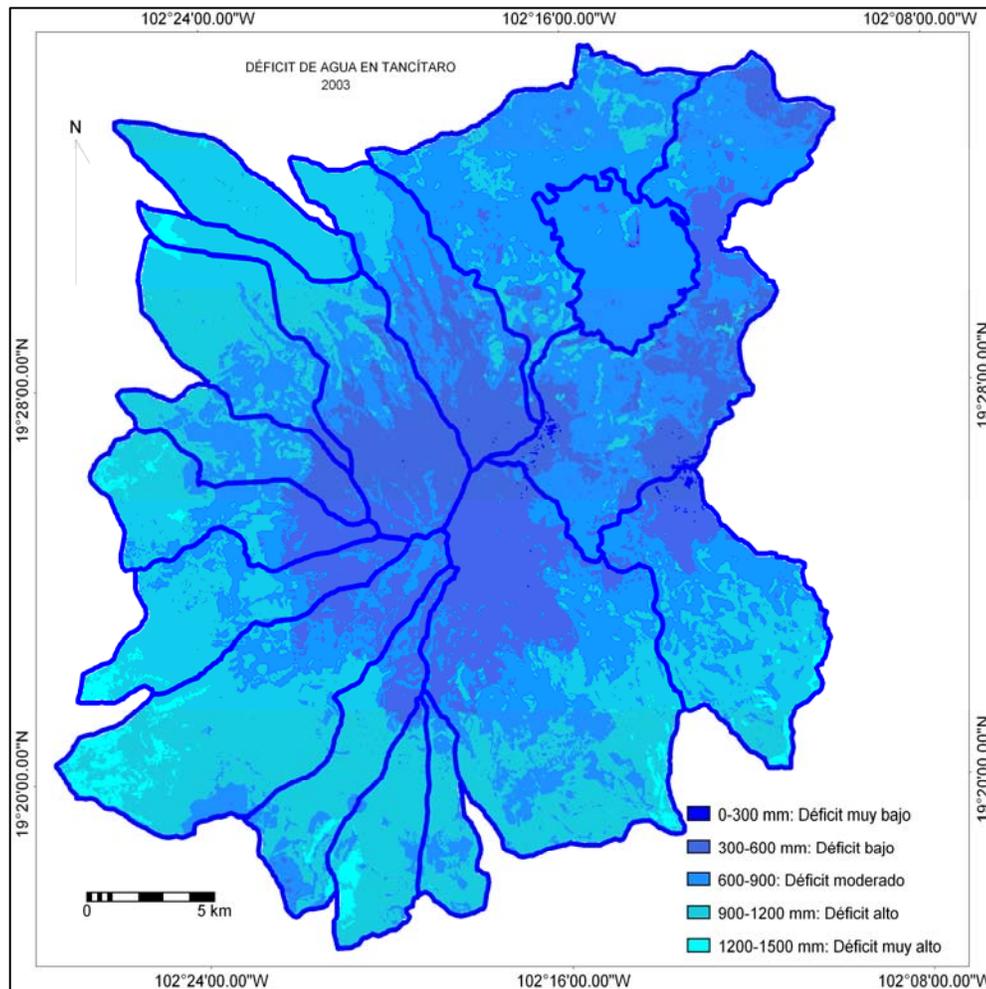


Figura 49. Mapas de déficit de agua para el año 1996 y 2003.

Fuente: Estimación propia.

La razón es que las coberturas de maíz y pastos también se han venido perdiendo a favor del cultivo de aguacate, lo que permite suponer que por un lado el excedente depende sobre todo de coberturas densas que almacenan agua en el suelo como los bosques primarios y aquellos con vegetación secundaria pero con coberturas cerradas. Por otro lado, es posible que el déficit de agua se haya detenido debido a que las coberturas que más le favorecen como los cultivos temporaleros y los pastos han ido disminuyendo a favor del cultivo de aguacate.

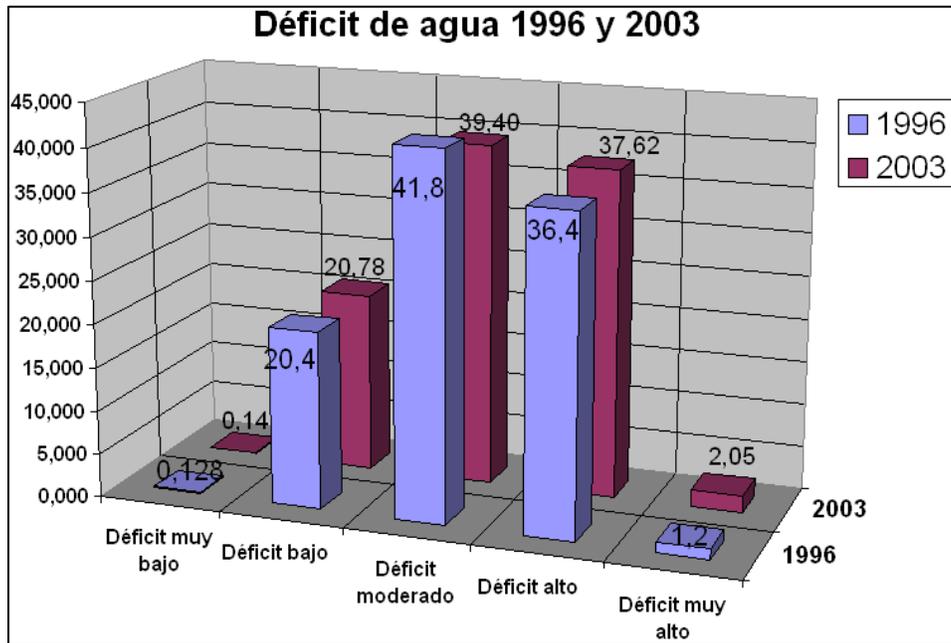


Figura 50. Comparación de la superficie con déficit de agua en el Tancítaro, para los años 1996 y 2003. Valores en porcentaje de superficie.
Fuente: Estimación propia.

La conclusión más importante de este fenómeno es que la oferta de agua se ve afectada al reducirse las coberturas que almacenan agua en mayor medida, reduciéndose el escurrimiento. Si la oferta disminuye y la demanda crece ya sea por requerimientos de riego o de la población, entonces es de esperar una crisis de agua superficial en el mediano plazo.

Oferta de agua subterránea.

Aunque la presente investigación no contempla el análisis detallado del aporte subterráneo, se incluye aquí un breve análisis muy preliminar sobre el aporte de agua subterránea y su relación con la oferta de agua superficial con el objeto de establecer la importancia de los acuíferos en la zona de estudio. En este aspecto, la CNA (www.cna.gob.mx) proporciona un balance de los acuíferos que abastecen a la región en estudio. Dichos acuíferos son denominados Apatzingán, Cotija y Uruapan. Estos acuíferos, de carácter regional encierran al Tancítaro en su interior (Figura 51), por lo que el Tancítaro aporta agua de recarga a las tres acuíferos.

Con base en los datos proporcionados por CNA, este autor estimó que el aporte subterráneo del Tancítaro es significativo (Cuadro 35). Lo anterior, como un elemento indicativo y asumiendo el aporte de agua en función del área que ocupa el Tancítaro dentro de los acuíferos.

Cuadro 35. Valor del volumen de agua en los acuíferos regionales de la zona de estudio y aporte de volumen de agua del Tancítaro según superficie ocupada por los acuíferos.

ACUÍFEROS	Área total ¹ (km ²)	Área de aporte del Tancítaro ² (km ²)	% del total ²	Volumen de recarga ¹ (Millones de m ³)	Volumen de aporte del Tancítaro ² (Millones de m ³)
Acuífero Apatzingán	5829.67	334	5.7	494.4	28.1808
Acuífero Cotija	2280.96	250.1	11.0	134.8	14.828
Acuífero Uruapan	1612.86	92.9	5.8	97.3	5.6434

¹Datos obtenidos de la página de CNA (<http://www.cna.gob.mx>); ²datos estimados por el autor.

Los acuíferos mencionados de acuerdo con CNA tienen un balance positivo, excepto el acuífero Apatzingán que presenta actualmente un déficit. Es decir, que en dos de ellos la recarga sigue siendo mayor a la extracción.. Tomando en cuenta que el aporte superficial es suficiente para la demanda de agua actual del Tancítaro, dos acuíferos no se encuentran amenazados por lo que constituyen una reserva de agua para el área de estudio.

Ahora bien, sumando el aporte de agua subterránea con el volumen estimado en este estudio, referido al aporte superficial, tenemos que la oferta hídrica total estimada en el Tancítaro se eleva a la cifra de 91.75 Mm³. De las cuales, el 45% corresponde al aporte del agua superficial.

A pesar de las cifras mencionadas, que son una estimación que debe tomarse con reserva porque no incluyeron las demandas de agua para uso ambiental (caudales ecológicos), no es posible bajo ninguna circunstancia pensar que el recurso hídrico es inagotable en Tancítaro. De hecho, lo que sugiere el presente trabajo es que la disponibilidad del agua superficial en el Tancítaro tiende a disminuir y no se vislumbra que se estabilice este nivel de déficit, sino por el contrario que el déficit aumente. Esta situación obliga a emprender acciones encaminadas a mejorar la gestión integral del recurso hídrico en el Tancítaro, esto es, lograr el manejo sostenible del agua superficial y subterránea.

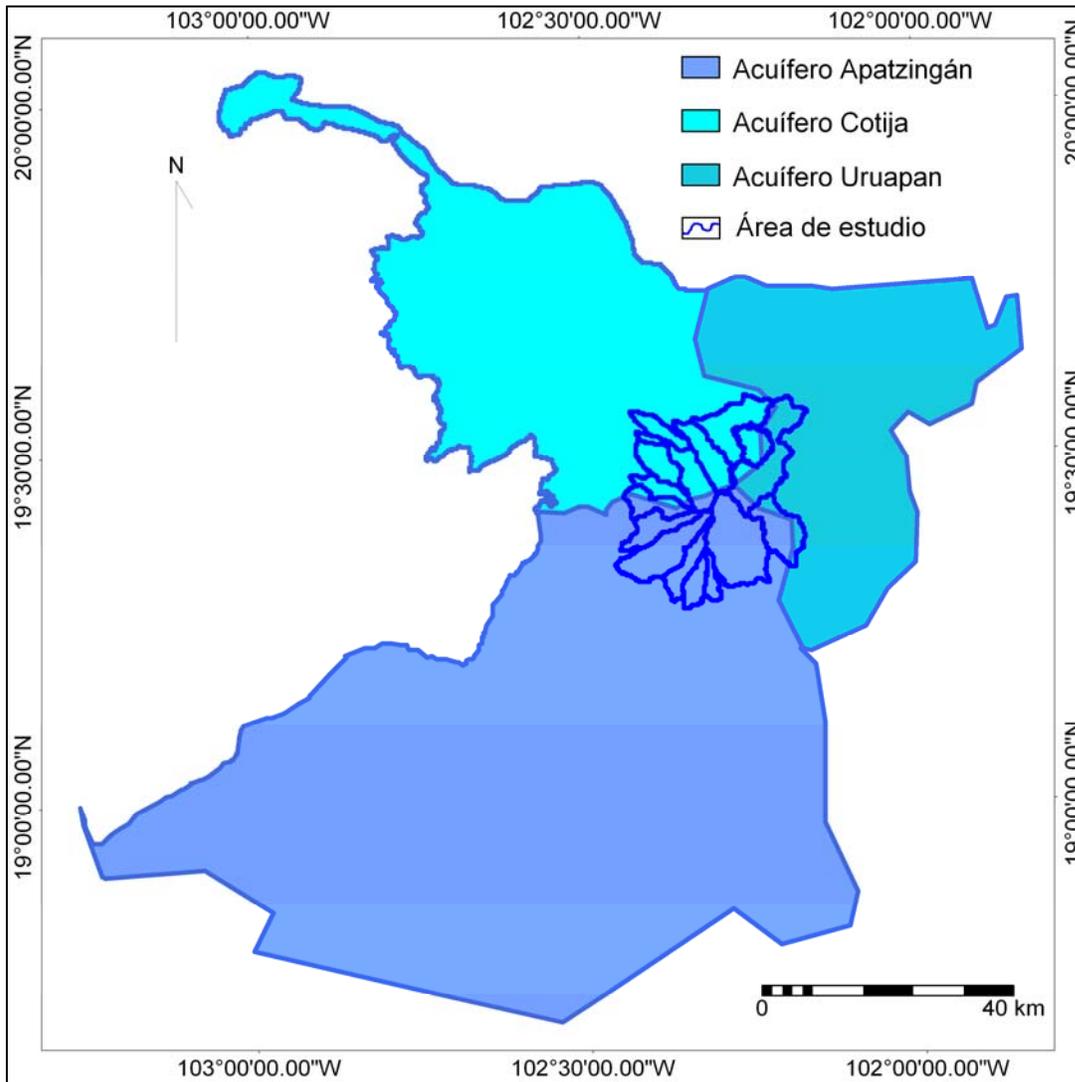


Figura 51. Acuíferos regionales del área de estudio.

Fuente: CNA. Elaboración propia.

CAPÍTULO 4. DEMANDA DE AGUA

Necesidades de agua según cultivos

Los cultivos predominantes en más del 60% de la superficie cultivada en el Tancitaro corresponde a cultivos comerciales de aguacate tanto bajo riego como de temporal (Fuentes, 2000). Y existen también cultivos anuales de temporal de durazno, de guinda (ciruela morada) y otros de mucha menor importancia, pero presentes en pequeños espacios de las parcelas tales como el cultivo de pera y manzana.

De esta forma, se observó que el único cultivo para el cual se destina el riego es el de aguacate. Tomando en cuenta lo anterior, el análisis se centró en las siguientes preguntas: ¿cuál es la superficie actual de aguacate?, ¿qué superficie de aguacate es regada?, ¿cuáles son los requerimientos de agua del aguacate cuando se le aplica riego en esta zona?

Con la respuesta a estas preguntas el estudio responde a la pregunta principal: ¿cuál es la demanda de agua por cultivos en el Tancitaro?

El análisis de la cobertura vegetal del Tancitaro indica que la superficie actual de aguacate es del 30.64% con respecto del total de las coberturas presentes (Cuadro 36), pero representa el 64% de la superficie cultivada en el área de estudio.

Cuadro 36. Cobertura vegetal del Pico de Tancitaro para el año 20051

Cobertura	%	Área (km ²)	Área (ha)
Cultivos anuales	17.07	115.5725	11557.25
Suelo desnudo	0.35	2.3525	235.25
Bosque cerrado	31.48	213.1425	21314.25
Campos de lava y de cenizas	6.39	43.2425	4324.25
Bosque abierto	13.43	90.9025	9090.25
Cultivos permanentes	30.64	207.44	20744
Zona urbana	0.65	4.37	437
TOTAL:	100	677.0225	67702.25

¹La cobertura fue obtenida de Garrido, 2005 y modificada por el autor.

Con datos recabados en campo y a través de entrevistas con campesinos y técnicos de las Juntas

Locales de Sanidad Vegetal de la SAGARPA, se pudo establecer que la superficie bajo riego está estimada en aproximadamente el 15% de la superficie total del aguacate. Esto no coincide con las estadísticas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), quienes estiman que el 30% de la superficie está bajo condiciones de riego (Tapia *et al.*, 2005).

De acuerdo con estos datos, se tendría que se riegan entre 3,111.6 y 6,223 ha del total de la superficie del aguacate.

De acuerdo con la Asociación Agrícola Local de Productores de Aguacate de Uruapan (AALPAU, <http://www.aproam.com/culti9.htm#3>), el requerimiento de agua para el cultivo de aguacate es de $536.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Sin embargo, en la guía para el cultivo del aguacate, que publica el INIFAP, se indica que el consumo de agua en este cultivo depende de la densidad de población. Una huerta con una densidad intermedia (100 árboles/ha) requiere alrededor de $677 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, los cuales se aplican durante enero a mayo, que es el periodo de secas (Tapia *et al.*, 2005). Para ello se utilizan obras de captación de agua de lluvia (ollas de agua, estanques, bordos, etc.) y obras de derivación para desviar aguas de los arroyos. Es decir, la demanda de agua para uso agrícola es durante el estiaje, lo cual puede causar conflictos sociales por concentrarse en esa época la demanda para uso doméstico y para la ganadería.

De acuerdo con los datos promedios de la AALPAU y el INIFAP, para irrigar una superficie de 4667 ha, con un consumo de $677 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, la demanda anual de agua sería de $3,160,000 \text{ m}^3$. Esta cifra representa la demanda total de agua para riego en el Tancítaro, ya que no se detectaron otras necesidades de riego salvo excepciones en el durazno y algunas hortalizas que son insignificantes por su tamaño e importancia.

Necesidades de agua según uso doméstico rural y urbano

Para construir el modelo de demanda de agua en el Tancítaro, se utilizaron datos de CNA (disponibles en la página WEB de dicho organismo para los años 1999 y 2000) para conocer el consumo de agua por habitante de la ciudad de Tancítaro, y de la cual existen datos (Cuadro 37). De esta forma, en este trabajo, se considera el consumo de agua medido y el estimado, como sinónimos de la demanda de agua por habitantes.

Cuadro 37. Consumo de agua por habitante al año y diario, en los años 1999 y 2000 en cuatro ciudades de la región del Tancítaro.

Localidad	Habitantes 2000 ¹	CONSUMO DE AGUA POR HABITANTE			
		Anual/1999 (M ³ /año/hab)	Diario/1999 (lts/día/hab)	Anual/2000 (M ³ /año/hab)	Diario/2000 (L/día/hab)
<i>Los Reyes de Salgado</i>	36095	170.87	468.14	170.8	467.93
<i>Nuevo San Juan Parangaricutiro</i>	11983	148.31	406.32	148.2	406.05
Tancítaro	5162	107.08	293.38	110.31	3022.26
<i>Uruapan</i>	225816	157.47	431.43	111.6	305.80

Fuente: CNA (Página WEB, <http://www.cna.gob.mx>); ¹CENSO INEGI, 2000.

Para el resto de las localidades en el área de estudio, fue necesario estimar la demanda por habitante con base en los rangos propuestos por CNA (1994) para el consumo de agua de acuerdo al nivel de salario mínimo de la población y los rangos térmicos donde habita (Cuadro 38).

Es necesario hacer notar que los rangos de temperatura presentes en el Tancítaro, para clasificar el consumo de agua según CNA (1994), oscilan entre 8.7 °C y 22.7°C en toda la zona de estudio (datos obtenidos de la interpolación de temperaturas de las estaciones ubicadas en toda la región del Tancítaro). De esta forma, se establecieron dos niveles de consumo de agua urbano y rural con base en CNA (1994) y el censo de INEGI (2000), mismos que corresponden a las dos zonas térmicas obtenidas para el Tancítaro y a los tres rangos de consumo según el nivel de salarios mínimos.

Cuadro 38. Consumo doméstico de agua per cápita diario estimado según CNA (1994).

Rangos térmicos en Tancítaro	Nivel de consumo según salario mínimo (L/día/hab)		
	Residencial (> 10 salarios)	Medio (6-10 salarios)	Popular o Rural (1-5 salarios)
18-22°	300	205	130
<18°	250	195	100

Para hallar el número de personas por nivel económico por localidad en el 2000, se decidió dividir el número total de habitantes entre el número de personas que reciben un salario. De esta forma, se obtuvo la relación porcentual que le toca a cada grupo de personas según su salario mensual. Esta proporción fue la que se consideró para conocer la demanda actual de acuerdo con los parámetros de consumo de CNA (1994) ya mencionados. Es decir, si el porcentaje de personas que ganan entre 1 y 5

salarios mínimos es del 80% del total de personas que reciben un salario en cualquiera de los tres rangos; entonces ellos representan al 80% de los habitantes de la localidad en cuestión.

De esta forma, si una población tiene 244 habitantes, y en dicha población el 95% del total con salario, reciben entre 1 y 5 salarios mínimos, entonces 231.8 personas se ubican en este nivel de consumo o demanda. Como consecuencia de este procedimiento, la suma de todas las proporciones de cada grupo de salarios da el 100% de la demanda de agua de la localidad (Cuadro 39).

Cuadro 39. Consumo de agua estimado (demanda) en 2000 para dos localidades en el Pico de Tancitaro, a partir del rango térmico y el nivel de salario, de acuerdo con CNA (1994).

LOCALIDAD	TROJAS, LAS	PATAMBURO
CUENCA	Chuanito	Cuenca Rodada
Rango Térmico T(°C)	18-22°C	18-22°C
POBTOT	244	203
Población con salario	60	38
Población que gana 1 a 5 SM	57	34
% (1-5 SM)	95	89.7
NO. Hab	231.8	181.6
Demanda en grupo de 1 a 5 SM (L/día/hab)	130	130
Consumo agua	30134	23612.1
Población que gana 6 a 10 SM	3	2
% (6 SM)	5	5.3
NO. Hab	12.2	10.7
Demanda en grupo de 6 a 10 SM (L/día/hab)	205	205
Consumo agua	2501	41615
Población que gana más de 10 SM	0	2
% (10 SM)	0	5
NO. Hab	0	10.7
Demanda en grupo de 10 o más SM (L/día/hab)	300	300
Consumo agua	0	3205.3
Consumo Total	30339	27022.4

El resultado promedio de consumo de agua convertido a demanda de agua para el año 2000 fue de 107.42L/día/hab.

Sin embargo, para poder decidir realmente si la estimación era razonablemente correcta, se consultaron los datos de la ONU en cuanto al consumo mínimo de agua para países en desarrollo y en zonas rurales, así como los de consumo de agua promedio en el Distrito Federal. De acuerdo con la ONU, el consumo mínimo de agua por habitante al año debe ser de 30 m³ per cápita al año o bien de 100 L/día/hab

(Falkenmark, 1989); mientras que en el Distrito Federal, el consumo de agua promedio actual es de 324 L/día/hab (CNA, 2007). De acuerdo con esto, las cifras de consumo de agua tanto estimadas por el autor como medidas por la CNA corresponden a cifras intermedias por lo que se consideran razonablemente acertadas para su consideración en este trabajo.

Finalmente, y aprovechando los datos disponibles tanto del Censo de 1990 como del Censo 2010, se estableció la tasa de demanda de agua para los últimos 20 años. El cálculo de la demanda de agua se basó en el promedio estimado de litros por habitante al día por cuenca en el año 2000 (107.42 L/día/habitante), ya que es en este año en el que se cuenta con la información de salarios mínimos por localidad. Finalmente, la tasa promedio de demanda obtenida del periodo 1990-2010, sirvió para establecer la demanda futura en el Tancítaro. El Cuadro 40 muestra la demanda de agua diaria por cuenca y el total diario del Tancítaro, para los años 1990, 2000, 2005 y 2010 en metros cúbicos.

Cuadro 40. Demanda total doméstica de agua, en metros cúbicos por día por cuenca y total del Tancítaro por día, para los años 1990, 2000, 2005 y 2010 en el Tancítaro.

POBLACIÓN Y DEMANDA DE AGUA POR CUENCAS EN EL PICO DE TANCÍTARO 1990-2010									
No.	Cuenca	1990		2000		2005		2010	
		Hab	m3/día	Hab	m3/día	Hab	m3/día	Hab	m3/día
1	Apo	1273	136.75	1581	169.84	1627	174.78	1784	191.65
2	Chondo	9470	1,017.31	11849	1,272.87	14243	1,530.05	16304	1,751.45
3	Chuanito	399	42.86	629	67.57	573	61.55	867	93.14
4	Cuenca Rodada	680	73.05	611	65.64	731	78.53	810	87.01
5	Cutio	1175	126.22	1309	140.62	1465	157.38	1734	186.27
6	El Chivo	255	27.39	334	35.88	423	45.44	499	53.60
7	Hoyicazuela	102	10.96	77	8.27	53	5.69	46	4.94
8	Huandiestacato	3470	372.76	4024	432.28	3560	382.43	4839	519.83
9	La Culebra	1587	170.48	2089	224.41	1946	209.05	2278	244.71
10	La Gringa	1260	135.36	1614	173.38	1587	170.48	2181	234.29
11	Nureto	2995	321.74	4752	510.48	4372	469.66	5821	625.32
12	San Francisco	1268	136.21	1716	184.34	1802	193.58	2250	241.71
13	Tancítaro	7986	857.89	9633	1,034.82	10069	1,081.66	11680	1,254.72
14	Zacandaro	840	90.24	815	87.55	1053	113.12	1240	133.21
15	Zirimóndiro	703	75.52	828	88.95	1035	111.18	1162	124.83
	Total:	33463	3,594.75	41861	4,496.90	44539	4,784.59	53495	5,746.68
	Demanda total al año:	1,312,084.131		1,641,369.686		1,746,374.058		2,097,538.791	

Fuente: Estimación propia con base en los censos de INEGI de 1990,2000, Conteo 2005 y 2010.

Como se puede inferir del Cuadro 35, el incremento estimado en la demanda ha sido de 2.64 % promedio por año durante el periodo de 20 años que va de 1990 a 2010; pasando de esta forma de una cifra estimada en 1,312,084.131 m³/año a 2,097,538.791 m³/año.

De acuerdo con este estimado, la cantidad total de agua requerida por la población en un año es de 2,097,538.791 m³/año lo que quiere decir que la demanda de agua doméstica para el 2025, y considerando que no habrá cambios en los patrones de consumo, podría ser de unos 2,928,164.15 m³/año para todas las cuencas del Tancítaro, o bien, de 8,022.37 m³/día . Esto es, considerando solo el incremento en la tasa de demanda de agua con base en el crecimiento poblacional.

Recapitulando los dos incisos de demanda de agua tanto agrícola como doméstica, se tiene lo siguiente:

Para el año 2010, la demanda de agua en usos consuntivos corresponde a la suma de la demanda para uso doméstico anual que es de 2,097,538.791 m³/año; más la demanda para uso agrícola que es como ya se mencionó, de 1,669,593.30 m³/año. La suma resultante es de 3, 767,132.09 m³/año (Cuadro 41).

Cuadro 41. Demanda de agua en el Pico de Tancítaro para uso doméstico y agrícola en el 2010.

Tipo de demanda de agua	Demanda en m³/año
Demanda de agua uso doméstico	2,928,164.15
Demanda de agua uso agrícola	1,669,593.30
TOTAL:	3,767,132.09

Fuente: Estimación propia.

CAPÍTULO 5. ESCENARIOS (ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS)

Modelo de oferta y demanda actual

Tomando en cuenta los resultados mostrados a lo largo de este trabajo, se ha llegado a un modelo actual de la oferta y demanda de agua (Cuadro 37). En síntesis, el modelo actual presenta las siguientes características (natural-ecológicas, social-manejo).

1. La presencia de coberturas vegetales fragmentadas acompañadas de una degradación paulatina pero evidente aunque aún sin una clara expresión de gravedad en su degradación.
2. Existe una clara distribución natural del agua por sectores en el Tancitaro. Las cuencas con mayor cantidad de agua se presentan en las laderas que miran al sur y al oeste, y las laderas norte y este poseen una menor cantidad del recurso hídrico.
3. La mayor cantidad de manantiales se localizan en las cuencas localizadas al este. La ocurrencia de esto probablemente se deba a que dicha zona es la de mayor actividad geológica reciente y la que presenta sustratos más porosos facilitando la percolación y con ello la presencia de manantiales.
4. Desde el punto de vista del uso antrópico, es significativo el hecho de que el 100% de las aguas tanto de manantiales como de arroyos y ríos se encuentran actualmente en uso, ya sea para riego o para consumo doméstico.
5. La oferta de agua actual, supera las necesidades de agua de la población por un estrecho margen. Pero además habría que considerar que estamos hablando del balance general, ya que la distribución del agua implica diferencias entre zonas del Tancitaro, provocando naturalmente que existan zonas deficitarias por un lado y con superávit por otro.

El cuadro 42 establece los valores de la oferta y demanda estimados en este trabajo para la población del 2010.

Cuadro 42. Oferta y demanda de agua actual para el Pico de Tancitaro.

Cuenca	Población (2010)	Clase de Demanda	Oferta Anual (m ³)	Demanda Anual (m ³)	BALANCE (Oferta- Demanda)	Disponibilidad de agua (Balance/Población)
Apo	1273	Alta	630,720.00	69,950.63	560,769.37	440.5
Chondo	9470	Alta	391,046.40	639,279.79	248,233.39	-26.2
Chuanito	399	Moderada	942,926.40	33,995.07	908,931.33	2278.0
Cuenca Rodada	680	Moderada	63,072.00	31,760.10	31,311.90	46.0
Cutio	1175	Moderada	195,523.20	67,990.13	127,533.07	108.5
El Chivo	255	Baja		19,565.79	-19,565.79	-76.7
Hoyicazuela	102	Baja		1,803.66	-1,803.66	-17.7
Huandiestacato	3470	Moderada	8,946,763.20	189,737.18	8,757,026.02	2523.6
La Culebra	1587	Baja	1,557,878.40	89,320.37	1,468,558.03	925.4
La Gringa	1260	Alta	750,556.80	85,517.00	665,039.80	527.8
Lavas del Paricutín	0	Baja		228,241.39	-228,241.39	0.0
Nureto	2995	Baja	532,958.40	228,241.39	304,717.01	101.7
San Francisco	1268	Moderada	485,654.40	88,222.49	397,431.91	313.4
Tancitaro	7986	Alta	1,936,310.40	457,972.77	1,478,337.63	185.1
Zacandaro	840	Baja	1,576,800.00	48,620.40	1,528,179.60	1819.3
Zirimóndiro	703	Moderada	63,072.00	45,562.02	17,509.98	24.9

Modelo pesimista de demanda de agua

Para la formulación de este modelo, se aplicaron las siguientes premisas:

1. La población crece al ritmo nacional actual, por lo tanto, hay incremento en la demanda de agua.
2. La cobertura natural disminuye de acuerdo a la máxima tasa de deforestación estimada (función de distancia) entre 1974 y 1996 y que es del 1.12% anual, aumentando asimismo, la cobertura de aguacate hasta el límite natural permisible. Hay por tanto, disminución de la oferta y aumento de la demanda por riego.

Para obtener el modelo espacial de este escenario, se realizó una evaluación del potencial natural tanto del cultivo de aguacate como del cultivo de maíz. Para cada cultivo se consideraron los requerimientos agroecológicos para su establecimiento en cuanto a temperatura, precipitación, textura del suelo, pendiente del terreno y altitud. El resultado para cada cultivo se muestra en las Figuras 52 y 53, mientras que el mapa potencial de los dos cultivos juntos se muestra en la Figura 54.

Para este último mapa, se consideró que la superficie potencial de aguacate se incrementaría a costa de todas las demás coberturas, incluyendo el maíz dado que éste último ha venido cediendo terreno al primero. Para llegar a una distribución potencial como la que se muestra en el mapa serían necesarios 16 años ya que la tasa anual de expansión del aguacate es de 1.12%.

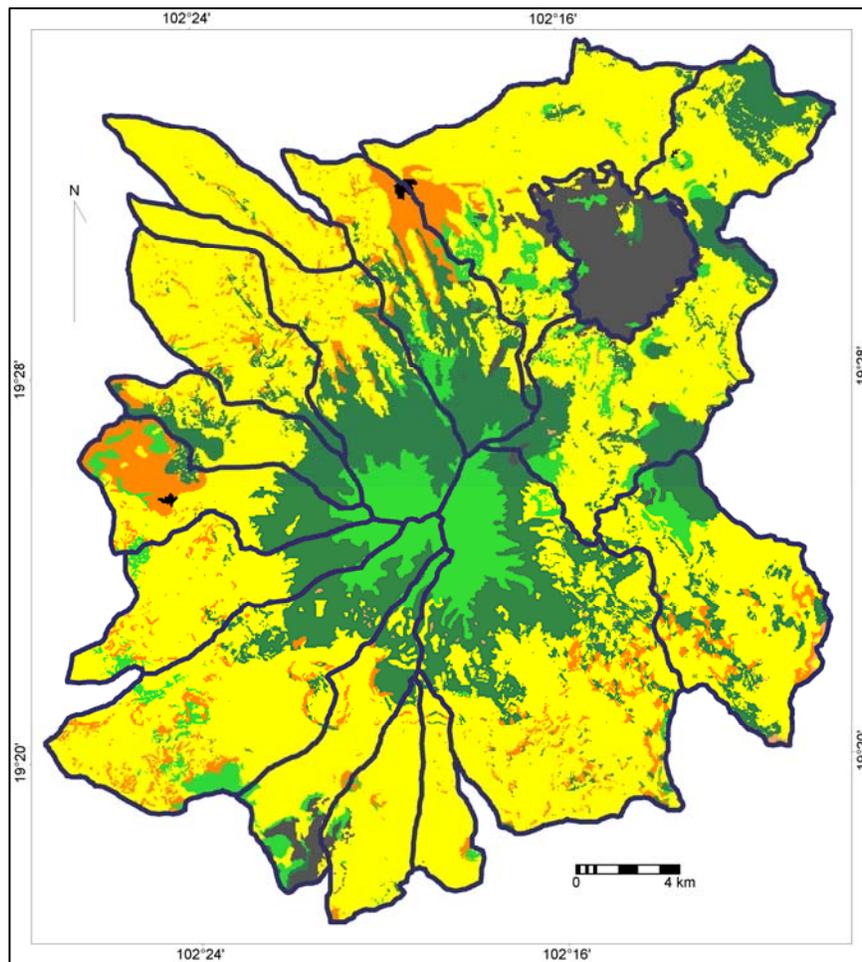


Figura 52. Mapa potencial de maíz en el Tancitaro. El maíz se aprecia en color amarillo.

Fuente: Estimación propia.

Es necesario decir que solo se consideran los requerimientos agroclimáticos y físicos, pero para generar un modelo más complejo, sería necesario considerar variables que escapan a los objetivos de este estudio como las variaciones en los precios, la toma de decisiones de los productores y la existencia de apoyos que alienten la producción del aguacate. Por tanto los modelos aquí descritos pueden considerarse solo como descriptivos y potenciales.

Bajo estas consideraciones la superficie potencial de riego (el 15% del total) en el año 2026, sería de

5,231.51 ha, que, multiplicadas por el consumo de agua por riego de aguacate nos dan un total de 3,541,732.27 m³/año

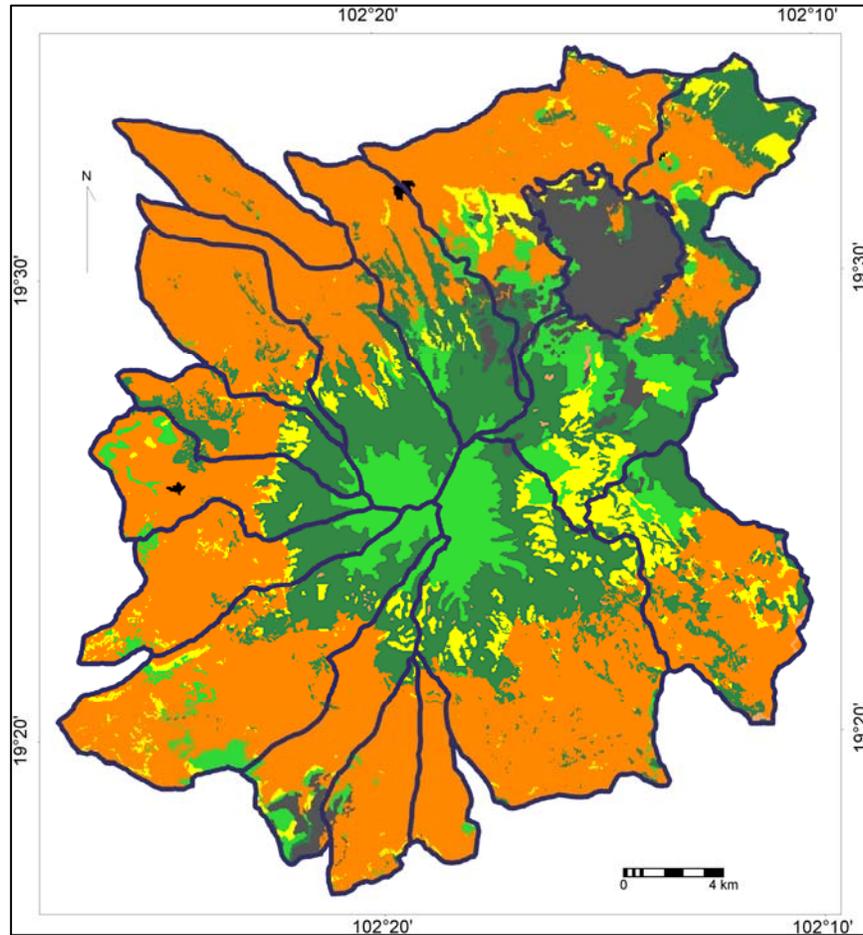


Figura 53. Mapa potencial de aguacate en el Tancítaro para el año 2026. El aguacate se aprecia en color naranja.

Fuente: Estimación propia.

Respecto a la población, se consideró un aumento del 1% anual, de acuerdo con la tasa de crecimiento poblacional del país. De esta manera, la población asentada en las 16 cuencas del Tancítaro pasaría de 53,495 habitantes en 2010, a 62,054.2 habitantes en el año 2026. El resultado de este aumento de población traería como consecuencia un aumento en la demanda de agua del 16%. Es decir, un total de 2,433,145 m³/año siempre y cuando el consumo se mantenga en 107.42 L/día/hab.

El total de la demanda estimada de agua para el 2026 en un escenario pesimista, incluyendo tanto el uso doméstico como el uso consuntivo de riego, sería entonces de 5,974,877.27 m³/año. Esta cifra constituye un aumento del 58.6%, respecto a la demanda actual.

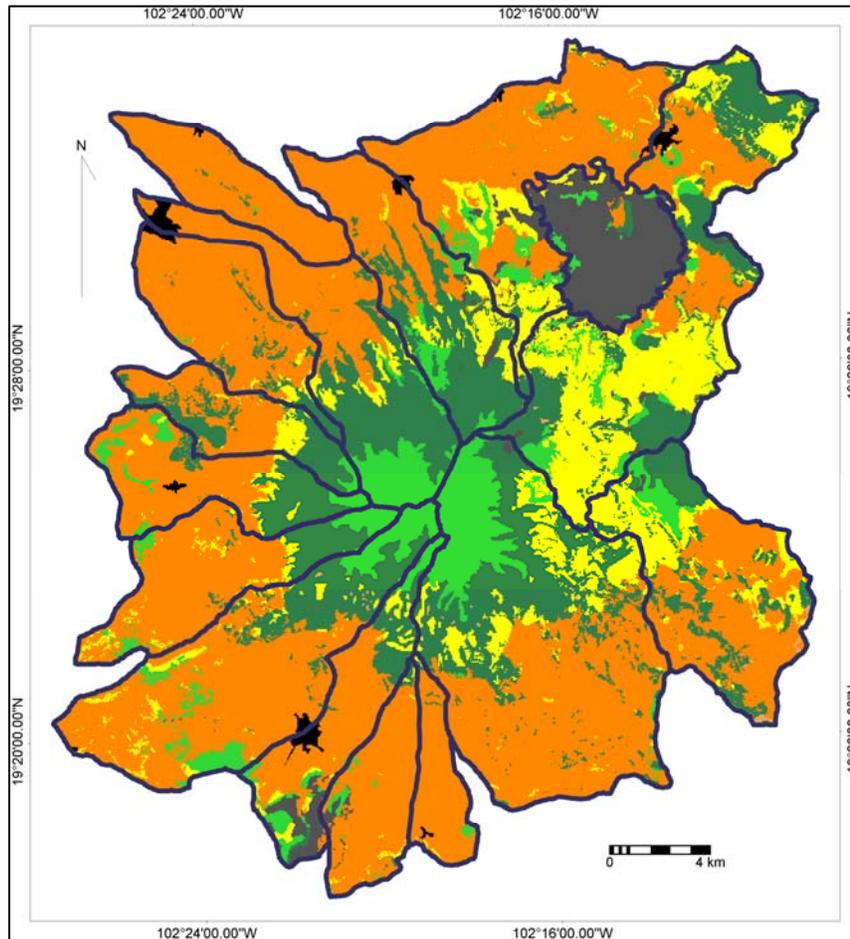


Figura 54. Mapa potencial de aguacate y maíz en el Tancítaro para el año 2026.

El aguacate se aprecia en color naranja y el maíz en amarillo. Fuente: Estimación propia.

Modelo optimista de demanda de agua.

Las premisas de este modelo fueron:

1. Disminuye la tasa de población en la región al ritmo estatal del 2005, que es una tasa negativa de -0.15 % anual.
2. La cobertura presenta recuperación de áreas al menos en los límites del aún parque nacional sobre todo en aquellas zonas que hoy en día son pastizales y arbustos y en las áreas situadas fuera del parque nacional, los bosques abiertos presentan recuperación pasando a ser bosques cerrados.

Para el caso de la cobertura del terreno, se estimó el desarrollo de la cobertura forestal asumiendo un escenario optimista en el que el bosque abierto se recupera pasando a ser cobertura de bosque cerrado (Figura 55).

Este cambio solo se asume para los bosques mixtos y/o de pino o encino, dejando fuera de este cálculo a la cobertura de *Pinus hartwegii* pues este tipo de vegetación es naturalmente abierta en su fisonomía y poco susceptible a cambios drásticos motivados por el hombre. En cambio, se considera que el cultivo de aguacate seguiría creciendo sobre las demás coberturas como la de maíz al ritmo de 1.12% anual.

El resultado de este estimado daría como resultado una recuperación del bosque cerrado que llegaría a conformar el 40.5% del área de estudio. A pesar de lo anterior, el cultivo de aguacate se ubicaría en 41.1% con un total de 27,490 ha; de las cuales 4,123 ha (el 15%) tendrían una demanda de agua por un total de 2,212,549.2 m³/año.

Por otro lado y tomando como base la población del 2005 (INEGI, 2005), se calculó la disminución de la población por cuencas hasta el año 2026 de referencia. La tasa utilizada fue la que corresponde al comportamiento poblacional del estado de Michoacán en el periodo 2000-2005 y que fue del -0.15% por año. De acuerdo con la página del gobierno del Estado de Michoacán (http://www.michoacan.gob.mx/Estadisticas_Dinamica_Poblacion), en 2005 el 84% de los municipios experimentaron tasas negativas en su crecimiento poblacional, sin embargo, es necesario notar que en la región que nos ocupa, solo el Municipio de Los Reyes tuvo decrecimiento, mientras que los demás municipios crecieron a tasas variables entre 4.8 y 0.61 (Cuadro 43); más aún, los datos al 2010 indican crecimiento poblacional en todas las cuencas. Por ello es que se ha tomado el dato del periodo 2000-2005, ya que es una cifra conservadora de decrecimiento.

Cuadro 43. Tasas de crecimiento poblacional 200-2005.

TASAS DE CRECIMIENTO POBLACIONAL 2000-2005	
Los Reyes	-1.68
Nuevo Parangaricutiro	0.85
Peribán	0.61
Tancítaro	4.82
Uruapan	0.88

Fuente: http://www.michoacan.gob.mx/Estadisticas_Dinamica_Poblacion

El resultado de calcular la disminución de la población con esta cifra, deja un número de habitantes de 52,211.12 para toda el área de estudio en el año citado. Es decir, una disminución de 1,124 habitantes respecto al año 2005. Con esta cifra se volvió a estimar la demanda de agua por habitante resultando en una demanda de 2,047,197.86 m³/año.

Con este escenario, la suma de la demanda de agua tanto agrícola como doméstica, sería de 4,259,747.06 m³/año. Es decir solo el 13.07% más que la demanda de agua actual y 45.5% menos que el escenario pesimista lo que dejaría un escenario mucho más sustentable.

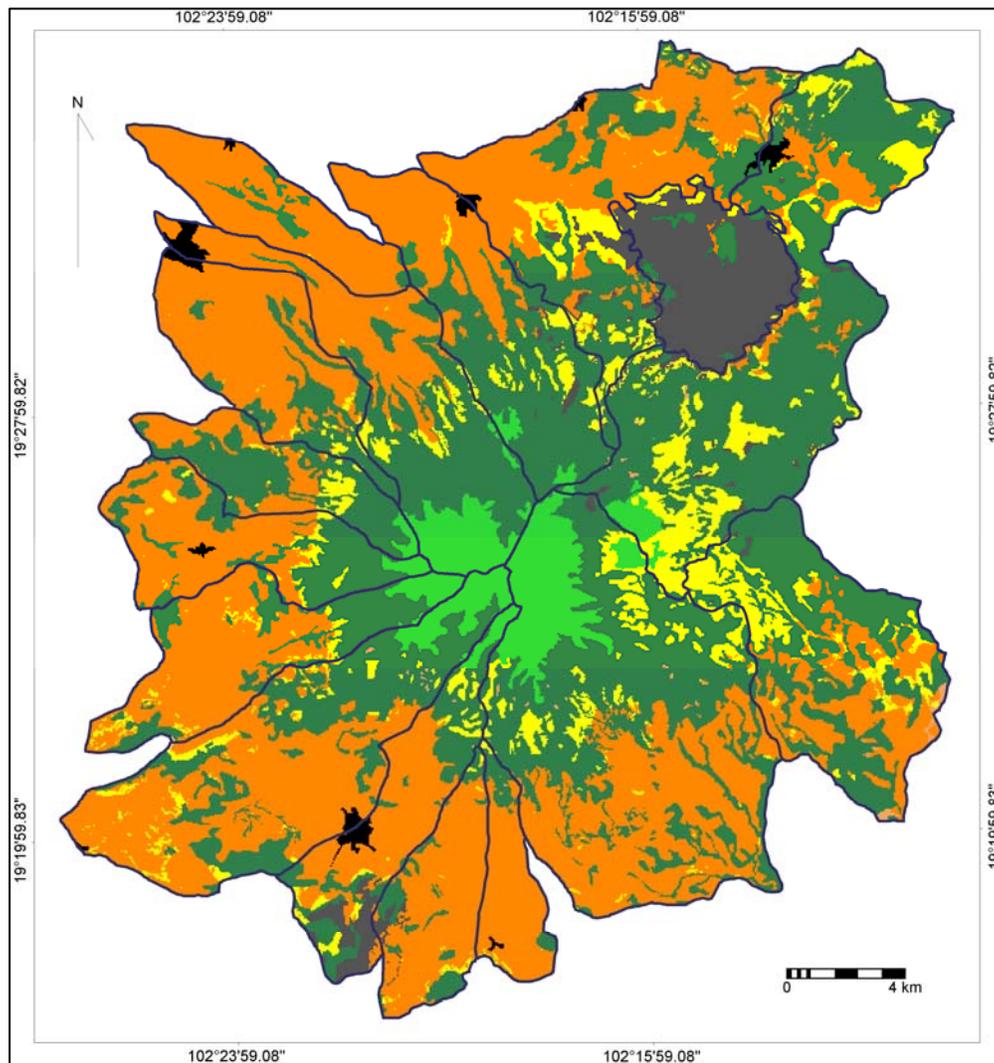


Figura 55. Mapa de cobertura potencial de bosque cerrado en el Tancitaro para el año 2026.

El aguacate se aprecia en color naranja y el bosque cerrado en color verde oscuro. Fuente: Estimación propia.

Cuadro 44. Comparativo de escenarios de volumen de demanda de agua doméstica por cuencas para el Pico de Tancítaro, Mich.

ESCENARIOS DE VOLUMEN DE DEMANDA DE AGUA DOMÉSTICA POR CUENCAS PARA EL PICO DE TANCÍTARO, MICH									
Cuencas	Demanda actual (2010)			Optimista con decrecimiento poblacional al 2026(-0.15% año)			Pesimista con aumento poblacional al 2026 (1% anual)		
	Habitantes	m3/día	m3/año	Habitantes	m3/día	m3/año	Habitantes	m3/día	m3/año
Apo	1,784.00	191.6455745	69,950.63	1,741.18	187.05	68,271.82	2069.44	222.31	81,142.74
Chondo	16,304.00	1751.451484	639,279.79	15,912.70	1,709.42	623,937.08	18912.64	2,031.68	741,564.56
Chuanito	867.00	93.13717104	33,995.07	846.19	90.90	33,179.19	1005.72	108.04	39,434.28
Cuenca Rodada	810.00	87.01396602	31,760.10	790.56	84.93	30,997.86	939.6	100.94	36,841.71
Cutio	1,734.00	186.2743421	67,990.13	1,692.38	181.80	66,358.37	2011.44	216.08	78,868.56
El Chivo	499.00	53.60490005	19,565.79	487.02	52.32	19,096.21	578.84	62.18	22,696.31
Hoyicazuela	46.00	4.941533873	1,803.66	44.90	4.82	1,760.37	53.36	5.73	2,092.25
Huandiestacato	4,839.00	519.8278785	189,737.18	4,722.86	507.35	185,183.48	5613.24	603.00	220,095.12
La Culebra	2,278.00	244.7133513	89,320.37	2,223.33	238.84	87,176.68	2642.48	283.87	103,611.63
La Gringa	2,181.00	234.2931604	85,517.00	2,128.66	228.67	83,464.60	2529.96	271.78	99,199.72
Nureto	5,821.00	625.3188842	228,241.39	5,681.30	610.31	222,763.60	6752.36	725.37	264,760.02
San Francisco	2,250.00	241.7054612	88,222.49	2,196.00	235.90	86,105.15	2610	280.38	102,338.09
Tancítaro	11,680.00	1254.719905	457,972.77	11,399.68	1,224.61	446,981.42	13548.8	1,455.48	531,248.41
Zacandaro	1,240.00	133.2065653	48,620.40	1,210.24	130.01	47,453.51	1438.4	154.52	56,399.66
Zirimóndiro	1,162.00	124.8274426	45,562.02	1,134.11	121.83	44,468.53	1347.92	144.80	52,851.94
TOTALES:	53,495.00	5746.68162	2,097,538.79	52,211.12	5,608.76	2,047,197.86	62054.2	6,666.15	2,433,145.00

Nota: No se incluye Lavas del Paricútín pues no tiene población. Fuente: Estimación propia.

Consideraciones respecto a la estimación del recurso hídrico bajo un esquema de manejo y conservación del parque nacional

El Pico de Tancítaro es una unidad de relieve con una enorme importancia hidrológica. En este sentido, su papel como sustento de vida trasciende la localidad para insertarse en la problemática mundial del agua. Dentro de dicha problemática, el cambio climático juega un papel determinante.

De acuerdo con estimaciones recientes sobre la influencia del cambio climático en el régimen hídrico (Ragab and Prudhomme, 2002; Huntington, 2003; IPCC, 2000), el Tancítaro sería una región con graves afectaciones que, sin embargo, ya son visibles.

Aunque este trabajo no aborda la problemática derivada de dicho fenómeno, la reducción de la cobertura vegetal y la tendencia de las precipitaciones casi constante a la baja en todas las estaciones climáticas observadas –y aunque es necesario llevar a cabo algunas pruebas estadísticas que confirmen la sospecha–, dan indicación de que el fenómeno del calentamiento global se está haciendo presente en el Tancítaro. Asimismo, la presencia cada vez menos frecuente o bien tardía de nevadas en la parte alta del Pico, da fe de lo dicho aunque también será necesario documentar esto.

Asimismo, otro problema que afecta la oferta de agua viene a ser la presencia de los cultivos de aguacate como un factor de contaminación aún sin evaluar. Esta es una tarea pendiente muy importante, ya que la naturaleza del sustrato de ésta área natural protegida hace que los acuíferos en ella sean muy vulnerables a la contaminación por agroquímicos, considerando la intensa actividad agrícola (no solo huertas de aguacate, sino también de durazno y “guindas”). Uno de estos contaminantes son los nitratos, por ejemplo, que muy probablemente ya estén contaminando algunos acuíferos.

Considerando lo anterior y tomando en cuenta los tres escenarios (el actual, el pesimista y el optimista), es posible construir una serie de argumentaciones que pudieran considerarse dentro de una propuesta de manejo del recurso hídrico. Creemos que esto es posible precisamente porque este estudio brinda una estimación del estado actual de la oferta y demanda de agua explicando de esta forma el porqué de la situación presente y porque se consideran dos perspectivas futuras del estado del recurso que plantean a 16 años de distancia cómo se desea que esté el recurso agua, pero también cómo no se desea que esté.

1. La estimación de oferta y demanda de agua actual sugiere que no se ha rebasado la oferta de agua en el Tancitaro. Sin embargo, se tendría que considerar que no fueron incluidas las demandas de agua para uso ambiental (caudales ecológicos). ni para los usos de la ganadería, y por otro lado que la distribución desigual del recurso hídrico sugiere también una serie de trasvases de una subcuenca que posee este recurso ((La Culebra, Zirimóndiro, Chondo, etc.) a otra subcuenca que carece de agua (La Gringa, El Chivo, etc.) bajo una planeación hidrológica y jurídica. Aunado a lo anterior se aprecian lo mismo cuencas sin habitantes (Lavas del Paricutín) que cuencas con una densidad poblacional alta (Tancitaro, Chondo, etc.).
2. Un elemento importante de la estrategia general del manejo del agua para esta región debería ser la difusión o transferencia de tecnologías que favorezcan el uso eficiente del agua en todos los usos, su distribución equitativa, reducción de la contaminación y su reciclamiento en las diferentes actividades agrícolas, uso domestico, para uso ambiental, etc. A la par, se debería crear una red de monitoreo del agua con estaciones climatológicas y de aforo para dar seguimiento de la cantidad, temporalidad y calidad del recurso agua.
3. Considerando la cantidad de actores, intereses encontrados de los diferentes usuarios y a que el agua es un tema que muy fácilmente se politiza, es conveniente instrumentar una política del agua en el Pico de Tancitaro, para evitar conflictos por el uso de este recurso. Por ejemplo, una política podría ser impedir o desalentarla producción de aguacate en cuencas con baja producción de agua, y en aquellas donde hay una gran producción de aguacate, seria incentivar o forzar la adopción de tecnologías de mayor eficiencia en el uso del agua.
4. El manejo del agua debería abordarse con un enfoque participativo que involucre a todos los usuarios y que de manera conjunta acuerden las necesidades de capacitación, diagnostico, planeación, solución y evaluación de diferentes programas y acciones encaminadas a lograr el manejo sostenible y empoderamiento de las comunidades y sus habitantes.
5. De acuerdo con los principios emanados de la Reunión de Dublín (1992), el agua, al ser un recurso finito y vulnerable esencial para la vida y el medio ambiente, debe considerar además de lo dicho en los puntos anteriores, un enfoque de género y su inclusión como un bien económico en el contexto del manejo y la gestión del agua.

6. También es de considerarse la atención de las cuencas con mayor deterioro. En este caso, existen cuencas cuyo deterioro amerita un programa de manejo inmediato para regular el uso del suelo y favorecer la recuperación de bosques (Apo, Chondo, Tancítaro, etc.) y aquellas cuencas cuyo deterioro aún es incipiente o poco importante (La Culebra, Lavas del Paricutín, etc.).

7. El análisis morfométrico aporta información que permite priorizar las cuencas para el manejo del agua de acuerdo con su “mejor” o “peor” comportamiento hídrico. De esta forma tenemos cuencas cuyos parámetros morfométricos indican una pobre capacidad de almacenamiento y un escaso desarrollo hídrico superficial (drenaje), como en el caso de La Gringa o El Chivo; y otras cuyo desarrollo, tamaño y forma favorecen la captación de agua como en el caso de las cuencas de La Culebra o Tancítaro.

8. Finalmente, se debe considerar con atención y en conjunto con los puntos anteriores, que las cuencas del Tancítaro por efecto del cambio climático estarán sometidas a un mayor régimen deficitario de agua, lo que condicionará enormemente entre otros a la agricultura y al desarrollo de esquemas de manejo donde se requieran grandes cantidades de agua. Por lo mismo, el esquema de manejo de agua que se adopte debe considerar la temporalidad del agua marcada fuertemente por una época de secas de más de 6 meses contra una de lluvias de menos de 6 meses.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La oferta y demanda de agua

De acuerdo con los datos mostrados a lo largo del estudio, se pudo estimar que en la región del Tancítaro la oferta de agua supera a la demanda.

Los trasvases de agua de una subcuenca a otra son frecuentes en el Tancítaro, lo que debe tenerse en cuenta para el manejo del agua ya que es una fuente de conflicto socio-ambiental.

Finalmente, de los escenarios propuestos en el último capítulo constituyen en cualquier caso, visiones moderadas del futuro del agua en Tancítaro ya que no son modelos complejos que involucren todas las variables que intervienen en la demanda de agua. Asimismo, por no ser el objetivo de este trabajo, no se incluye en dichos modelos el aporte subterráneo que, como ya vimos tendría un efecto importante en la oferta de agua.

Es evidente que el Tancítaro produce más agua de la que se requiere por parte de las poblaciones aledañas al volcán y que se encuentran dentro de las cuencas consideradas. Lo anterior indica que por ahora, el problema de escasez de agua está sobre todo, en la administración que se hace del líquido.

A pesar de esta conclusión, conviene reflexionar sobre el futuro del agua en Tancítaro. La oferta de agua es mayor a la demanda como se ha podido comprobar. Sin embargo, como ya se ha visto en este trabajo y tomando como base la estimación del balance hídrico superficial, el déficit de agua ha venido acentuándose mientras que el excedente disminuye.

De esta forma, si el agua superficial tiende al agotamiento como parece ser, la consecuencia lógica es que los acuíferos también se agotarán inevitablemente como ya sucede en otras partes del país.

De hecho, las formas del consumo actual y el manejo que se hace de las fuentes de agua indican que muy pronto el Tancítaro podría tener una crisis de agua superficial esta vez por falta del líquido. El análisis indica que los usos actuales tanto domésticos como agrícolas son inadecuados y que no se efectúa ninguna política ni estatal ni municipal que atienda el uso sustentable del agua.

A pesar de lo anterior, los escenarios propuestos no cambian en su esencia ya que al estar relacionados los aportes superficiales y los subterráneos, deberán esperarse efectos en cadena por el mal uso y desperdicio del agua, lo que produciría (si se permite conjeturar un poco más allá de la evidencia), la concatenación de dichos efectos afectando la oferta de agua de los acuíferos.

Este trabajo permite observar que el uso de datos existentes más el de los datos tomados en campo para estimar un fenómeno (como la oferta y demanda de agua en este caso) y su adecuado tratamiento, aporta información significativa para el manejo de los recursos naturales.

En un país como el nuestro donde no es precisamente la abundancia de datos sobre nuestros recursos lo que distingue al acervo científico y documental del paisaje; la estimación de datos y el diagnóstico ambiental a través de dichas estimaciones cobra relevancia para atender aquellas problemáticas que requieren soluciones urgentes con cierto grado de certidumbre.

BIBLIOGRAFÍA

Abulohom M. S, Shah S. M. S. and Ghumman A. R. 2001. Development of a Rainfall-Runoff Model, its Calibration and Validation. *Water Resources Management* **15**: 149–163.

Agricultural Compendium for Rural Development in the Tropics and Subtropics. 1981. Elsevier Scientific Publishing Company, The Netherlands.

Arnell, N. W. 1999. Climate change and global water resources. *Global Environmental Change*. 9: S31-S49.

Arriaga, L., J.M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (coordinadores). 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México.

Ávila, Patricia 1996. Escasez de agua en una región indígena de Michoacán. El Colegio de Michoacán, México, 427p.

Ayllón T. 1987. *Introducción a la Meteorología*. Ed. Trillas. México, D.F.

Badr-Eldin T. O.(1996). *GIS-Hydrological Modelling In Arid Lands. A geographical synthesis of surface waters for the African Red Sea region in the Sudan*. Avhandling för filosofie doctors examen.Lund University Press. Sweden. 202 p.

Beek, M. A., 1996. *Drenage pattern analysis and extraccion of hydrologic properties from a digital elevation model*. MSc. Thesis en Land Resource Management.Silsoe College, Cranfield University. 45 p.

Benítez D. H., Villaseñor G. J. F., Villaseñor G. L. E., Chávez L. G., Villalón C. R. M., AICA: C-05, Tancitaro. En: Benítez, H., C. Arizmendi y L. Marquez. 1999. Base de Datos de las AICAS. CIPAMEX, CONABIO, FMCN, y CCA. (<http://www.conabio.gob.mx> .México).

Bocco G. y M. Mendoza 1999. Evaluación de los cambios de la cobertura vegetal y uso del suelo en Michoacán (1975-1995). Lineamientos para la ordenación ecológica de su territorio. Programa SIMORELOS-CONACYT. Informe Técnico. Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM, Campus Morelia. Michoacán, México. 50 pp. más anexos.

Bocco G., A. Velázquez, M. Mendoza, M. Torres y A. Torres 1996. Regionalización ecológica del estado de Michoacán de Ocampo. Informe Técnico elaborado para el Instituto Nacional de Ecología (SEMARNAP). Centro de Ecología, UNAM, Departamento de Ecología de los Recursos Naturales (Unidad Académica Morelia). Morelia, Mich. 95 pp.

Bocco G., C. Garibay y J. Fuentes, 1999. *2º Informe Técnico*. Presentado a PROFEPA-CONACyT.

- Bohn Y. y Campo M., 2007 Estimación de escurrimientos superficiales para cuencas no aforadas en Corrientes, Argentina. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, Núm. 71, 2010, pp. 31-42
- Brady N.C. and Weil R.R. 1996. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall International Editions. 11th ed. 97 p.
- Bravo-Espinosa, M., J. de la L. Sánchez, J. A. Vidales, J. T. Sáenz, J. G. Chavez, S. Madrigal, H. J. Muñoz, L. M. Tapia, G. Orozco, J. J. Alcanzar, I. Vidales, E. Venegas. 2009. Impactos ambientales y socioeconómicos del cambio de uso del suelo forestal a huertos de aguacate en Michoacán. Publicación Especial 2. INIFAP- Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Mich.
- Campos A., D. F. 1987. Procesos del ciclo hidrológico. Edit. Universitaria Potosina. UASLP. SLP, México. Vol. 1, Tomo 1/2.
- Chow V.T., Maidment D. y Mays L. 1987. *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill. México, D.F.
- CLAS-ITC, 1999. *Balance hídrico estimativo y provisional del Valle Alto en el Departamento de Cochabamba*. Informe Técnico. ITC, CLAS. Bolivia.
- Comisión Nacional del Agua, 1994. Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Datos Básicos. Comisión Nacional del Agua. México, D.F. 90 p.
- Comisión Nacional del Agua, 2007. Situación del Subsector de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2007. Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT. México D.F. 247 p. (<http://www.conagua.gob.mx/conagua/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=Publicaciones%202007/%20PUBLICACIONES|8|0|0|0|0>)
- CONABIO, 1999. *Regiones Prioritarias Terrestres*. Escala 1:1'000,000. México.
- Dávila P., S. 2006. El poder del agua. ¿Participación social o empresarial? México, experiencia piloto del neoliberalismo para América Latina. Editorial Itaca. México, DF.
- De Bolós, M. 1992. *La Ciencia del Paisaje*. Ed. Masson. Barcelona, España.
- Domingo F., Villagarcía L., Boer M. M., Alados-Arboledas L. and Puigdefábregas J.. 2001. Evaluating the long-term water balance of arid zone stream bed vegetation using evapotranspiration modeling and hillslope runoff measurements. *Journal of Hydrology*, 243 (2001) 17–30.
- Eckhard, K. and U. Ulbrichb, (2003). Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology*, 284: 244–252.
- FAO, 1976. “Las necesidades de agua de los cultivos”, *Estudio FAO: Riego y Drenaje*, No. 24. ONU-FAO. Roma, Italia. 193 p.
- FAO: 2003, Review of world water resources by country. Water Reports 23, Food and Agricultural Organization of the United Nations. Rome.

Farina A., 1997. *Principles and Methods in Landscape Ecology*. Chapman & Hall. London. 235 p.

Flores V. O. y P. Gerez, 1994. *Biodiversidad y Conservación en México: vertebrados, vegetación y uso del suelo*. CONABIO-UNAM. México, D.F. 439 p.

Fuentes J. J. 2000. *Evaluación del deterioro ambiental en áreas naturales protegidas. Un enfoque geomorfológico. El caso del Parque Nacional Pico de Tancitaro, Michoacán*. Tesis de Maestría. Fac. de Fil. y Letras, UNAM. México.

Fuentes J.J. y Alvarado R. F. (2006). Programa de Manejo Operativo de la Montaña Prioritaria Pico de Tancitaro. Informe Final. Comisión Nacional Forestal. México.

Fuentes J.J. y Alvarado R. F. (2006). Informe Técnico de Caracterización y Diagnóstico del Municipio de Cotija Mich. Documento interno. CIECO, UNAM.

Fuentes, J. J. 2000. Evaluación del deterioro en áreas naturales protegidas. Un enfoque geomorfológico. El caso del Parque Nacional Pico de Tancitaro, 77 El relieve como modelador Michoacán. Tesis de maestría. Facultad de Filosofía y Letras, División de Estudios de Posgrado, UNAM.

García, 1990. *Balance hídrico del Proyecto Intervalles*. Proyecto CPAS, Bolivia.

García E. 1984. *Apuntes de Climatología*. Facultad de Ciencias. UNAM. México.

García-Ruiz et. al., 1998. Flora del Parque Nacional Pico de Tancitaro. Informe Técnico Final. CIIDIR-IPN-Michoacán. CONABIO. Proyecto H304. México. 151 p.

García-Ruiz. Coms. Pers. Centro de Investigaciones

Garduño-Monroy, V.H., Corona Ch. P., Israde, A I., Menella L., Arreygye E., Bigioggero B. y Chiesa, S. 1999. *Carta geológica del estado de Michoacán, Escala 1:250,000*. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Instituto de Investigación Metalúrgicas. Morelia, Mich. 111 pp.

Gil Verónica; Gentili, Jorge O. y Campo, Alicia M. Influencia de la litología en la variación de los parámetros morfométricos, sistema de ventania, argentina. Papeles de Geografía [en línea] 2009. Disponible en Internet: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=40712345006>. ISSN 0213-1781.

Gonzalo R., Domínguez C., Marín R. y Vanegas R., 2004. Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D.C., 30 p.

González, B. 1982. *Ecología del Paisaje*. Colección ¿Qué sé?. Barcelona, España.

Gordon N.D., McMahon T.A y Finlayson B.L.(1993). *Stream Hydrology. An introduction for ecologists*. John Wiley & Sons Ltd. 523 p.

Goudie A., Anderson M., Burt T., Lewin J., Richards K., Whalley B. and Worsley Peter. 1981. *Geomorphological Techniques*. British Geomorphological Research Group. George Allen and Unwin (Publishers). Ltd. London. 395 p.

Gregory K.J. and Walling D.E. 1985. *Drainage basin form and process. A geomorphological approach*. Edward Arnold (Publishers). Ltd. London. 457 p.

Huntington, T.G. (2003). *Climate warming could reduce runoff significantly in New England, USA. Agricultural and Forest Meteorology* 117:193–201.

IMFIA-MTOP-DNH, 2001. *Balances hídricos superficiales en cuencas del Uruguay*. Universidad de la República, Facultad de Ingeniería- Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

INEGI, 1996. *Anuario Estadístico del Estado de Michoacán*. INEGI-Gobierno del Estado de Michoacán. México. 435 p.

INEGI-SEMARNAP (1997). *Estadísticas del Medio Ambiente, 1997. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente, 1995-1996*. INEGI.México. 461 p.

INE-SEMARNAP (1999). *Listado de las áreas naturales protegidas en México*. Página WEB actualizada al 28 de julio de 1999. Dirección:<http://www.ine.gov.mx/ucanp/index5.html>

IPCC (2000), *Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad*. Capítulo 6: América Latina. Informe Especial. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Organización Mundial Meteorológica, Programa Mundial de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 45 p. (Versión digital: <http://www.grida.no/climate/ipcc/regional/pdf/amla.pdf>)

IPCC, (2001). In: Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (Eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

ITC, 1999. *Precipitation. Lecture Notes*.

Jacobs J H. and Srinivasan R. 2005. Effects of curve number modification on runoff estimation using WSR-88D rainfall data in Texas watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*. Sep/Oct 2005. Vol.60, Issue 5; pg.274, 6 pgs.

Jhonson, N., Revenga, C. and Echeverría J.: 2001, *Managing water for people and nature*. Policy Forum: Ecology. *Science's Compass* **292**.

Jippe Hoogeveen, 2000. *A regional water balance of the Aral Sea basin through GIS*. Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Web Publications. <http://www.fao.org/ag/AGL/AGLW/wpub.htm>

Jardi, M. 1985. *Forma de una Cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen*. Revista de Geografía. Vol. XIX. Barcelona, pp.41-68.

Kenneth N.B., Ffolliott P.F., Gregersen H.M. and Thames J.L. (1992). *Hydrology and the management of watersheds*. Iowa State University Press. 2nd. printing. Iowa.383 p.

Knight C. G., Chang H., Staneva M. P. and Kostov D. 2001. A simplified basin model for simulating runoff: The Struma River GIS. *Professional Geographer*, 53 (4) 2001, pages 533-545.

Kulshreshtha S. N.: 1998, A global Outlook for water resources to the year 2025. *Water resources Management* **12**: 167-184.

Kundzewicz, Z. W. and Somlyódy L., (1997). Climatic change impact on water resources in a systems perspective. *Water Resources Management*. 11: 407-435.

Maidment D.R. 1992. *Handbook of Hydrology*. McGraw Hill. New York.

Maderey R. L., 2005. Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. Colaborador: Arturo Jiménez Román. Geografía para el siglo XXI (Obra General) Serie Textos Universitarios, Núm. 1. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, 2005.

McIntosh P.: 2001, Water for the future: Four commonsense principles *International Wildlife* **31**(5). Vienna.

Meijerink A. M. J., H.W. Donker, H. de Brouwer and T. Iswadi. 1988. *The water module: a toolbox for processing hydrologic data*. In: Meijerink J., C. Valenzuela y A. Stewart (eds.) *Scientific status report on the project Geo Information System for Land Use Zonning and Watershed Management*. ITC Publication, number 7.

Meijerink A. M. J. 1988. *Data acquisition and data capture through terrain mapping units*. In: Meijerink A. M. J., C. Valenzuela y A. Stewart (eds.) *Scientific status report on the project Geo Information System for Land Use Zonning and Watershed Management*. ITC Publication, number 7. Enschede, The Netherlands.

Meijerink, J.M.A. 1992. *Evaporation and Evapotranspiration*. ITC Postgraduate Courses in Water Resources Surveys. The Netherlands. 43 p.

Morales N. y C.P. Saavedra, 1998. *Aportes del SIG para la determinación del déficit de agua dentro del componente de riego del Proyecto Múltiple Misicuni*. Tesis M.P. CLAS-ITC-UMSS, Cochabamba, Bol. 98 p.

OEIDRUS. Boletín estadístico del sector agropecuario. OEIDRUS. No. 11, Año 3. Agosto 2007.
Ragab, Ragab and Christel Prudhomme, (2002). Climate Change and Water Resources Management in Arid and Semi-arid Regions: Prospective and Challenges for the 21st Century. *Biosystems Engineering* 81 (1), 3-34.

Ordoñez D. M. y V. O. Flores, 1995. "Áreas Naturales Protegidas", *Serie Cuadernos de Conservación*, No. 4. PRONATURA, A.C.-Conservation International de México, A.C. México, D.F. 43 p.

Ramírez S. L.G. 2009. Tesis de Maestría. Posgrado en Geografía, UNAM.

Rees, J. D. 1970. Paricutin Revisited: A review of Man's Attempts to adapt to Ecological Changes Resulting from Volcanic Catastrophe. *Geoforum* No. 4: 7-25.

Salinas M. 1998. *Actualización de la base de datos climática del Estado de Michoacán. Tesis de Licenciatura*. Facultad de Biología, UMSNH. Morelia, Mich.

Scattolin M. 1996. Studio geológico e morfometrico del settore centro occidentale della Meseta Tarasca, Michoacán, Messico. Tesi di Laurea. Università degli Studi di Milano, Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. Milano, Italia. 136 pp.

Scott V. Ollinger, John D. Aber, Anthony Federer, 1998: Estimating regional forest productivity and water yield using an ecosystem model linked to a GIS. *Landscape Ecology* 13:323-334.

Segerstrom K. 1950. Erosion Studies at Paricutín, State of Michoacán, México. Geologic Investigations in the Paricutín Area, México. *Geological Survey Bulletin*, 965-A. Washington, D.C. 164 pp.

SEMARNAT, 2003. El Medio Ambiente en México. En Resumen. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 131 pag., (Versión Digital: http://www.semarnat.gob.mx/estadisticas_2000/informe_2000/res_ejecutivo/index.shtml)

SERGEOMIN, 1990. *Isoyetas, Isotermas, Zonificación Climática y Cuencas*.

Serruto, C. R., 1993. *Una nueva fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial*. Programa interinstitucional de Waru Waru, Fac. de Ciencias, Puno.Puno, Perú. 13 p.

Sophocleous, M. (2004). Global and Regional Water Availability and Demand: Prospects for the Future. *Natural Resources Research*, Vol. 13, No. 2, June 2004.

Soil Conservation Service of the United States. 1984. *Manual de Conservación de Suelos*, USDA.

Strahler H. A y Strahler N. A. 1997. Geografía Física. Ed. Omega. México, D.F. 636 p.636 p.

Tapia, M., I. Vidales y J. Anguiano. 2005. Uso y manejo del agua en el cultivo del aguacate. Campo Experimental Uruapan, INIFAP. Folleto Técnico.

Thornthwaite C. W. and Mather J. R. 1955. "The Water Balance, Laboratory of Climatology", *Publication No. 8*, Centerton, N.J.

Torres A. y G. Bocco, 1999. *Cambio de uso de suelo por cultivo de aguacate en la Meseta Tarasca, Michoacán para los años de 1970 y 1990/92*. En: Bocco G. y M. Mendoza, (1999). Evaluación de los cambios de la cobertura vegetal y uso del suelo en Michoacán (1975-1995). Lineamientos para la ordenación ecológica de su territorio. Programa SIMORELOS-CONACYT. Informe Técnico. Departamento de Ecología de los Recursos Naturales, Instituto de Ecología, UNAM, Campus Morelia. Michoacán, México. 50 p más anexos.

Torrice T. M., 1998. *Comparación de balances hídricos del Valle Alto de Cochabamba mediante tres métodos diferentes*. Tesis de Maestría Profesional. CLAS-ITC, Universidad Mayor de San Simón. Cbba. Bolivia. 41 p.

Tricart, J. 1982. La Ordenación del Medio Geográfico.

UNESCO: 2001, La seguridad del agua: evaluación preliminar de los avances en materia de políticas desde Río. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) de las Naciones Unidas.

UNESCO-PHI, 2000. Balance hídrico superficial de América Latina. UNESCO-PHI, 61 p.

U.S. Army Corps of Engineers, 1994. *Flood-runoff analysis*. CECW-EH, Engineer Manual. Department of the Army. Washington, D.C.

V.U. Smakhtin, 2001 Review. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology* 240 (2001) 147–186

Vandewiele, G.L., Xu, C.-Y. and Huybrechts, W.:1991, *Regionalisation of physically based water balance models in Belgium: application to ungauged catchments*, *Water Resour. Manage.* 5, p 199-208.

Vargas M.F. (1984). *Parques Nacionales y reservas equivalentes*. Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM. México. 266 p.

Vaux Jr H.: 2002, A U.S. water research agenda for the twenty-first century. *Environment*. 44(4). pp. 32-43. Washington.

Van Zuidam, R. A. 1991. *El Sistema ITC para levantamientos geomorfológicos*. ITC Publication No. 10, Holanda, 89 pp.

——— 1986. *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. ITC, Smits Publishers, The Hague. 442 pp.

Vázquez Selem Lorenzo. Coms. Pers. Instituto de Geografía UNAM

Velázquez A. et. al., 1997. *Vegetación de la ladera norte del Pico de Tancítaro*. Biología de Campo. Facultad de Ciencias. Informe de Biología de Campo. UNAM. México.

Verstappen H.; (1983). *Applied Geomorphology. Geomorphological Surveys for Environmental Development*. International Institute for Aerial Survey and Earth Science (ITC). Enschede, Amsterdam. 437 pp.

Verstappen H. Th. y Van Zuidam R. A. 1991. “El sistema ITC para levantamientos geomorfológicos”, *ITC Publicación N° 10*. 89 p.

Williams H. 1950. Volcanoes of the Parícutin Region Mexico. *Geologic Investigations in the Parícutin Area, Mexico. Geological Survey Bulletin*, 965. United States Department of the Interior, Washington. 65-279 pp.

WRI, 2000, *Guía de Recursos Mundiales 2000-2001, La Gente y los ecosistemas: se deteriora el tejido de la vida*. Instituto de los Recursos Mundiales, PNUMA, PNUD, BM, WRI.

Xu C.Y. and SINGH V. P. 1998. A Review on Monthly Water Balance Models for Water Resources Investigations. *Water Resources Management* **12**: 31–50, 1998.

Xu, C.-Y, 1997: Application of Water Balance Models to Different Climatic Regions in China for Water Resources Assessment. *Water Resources Management* ,February, Volume 11, Number 1, pp 51-57.

Xu, C.Y. 1999. Estimation of Parameters of a Conceptual Water Balance Model for Ungauged Catchments. *Water Resources Management* **13**: 353–368, 1999.

Zuidam, R.A. van and F. van Zuidam-Cancelado, 1979. Terrain Analysis and Classification using Aerial Photographs. ITC Textbook VII-6,358 p.

ANEXOS

Importancia socio-ambiental del Tancítaro.

El Pico de Tancítaro posee una extraordinaria diversidad tanto biofísica como social y una importancia económica innegable. Esta diversidad puede resumirse en el siguiente cuadro:

El Pico de Tancítaro en cifras socioambientales.

SISTEMA BIOFÍSICO	
Geología	17 unidades litosomáticas con antigüedades desde los 500 mil años
Geomorfología	24 unidades de relieve de cuarto orden asentadas en un estratovolcán
Suelo	82 asociaciones de suelo con 7 unidades principales, 11 secundarias y 9 terciarias
Agua	16 cuencas y ríos principales que drenan un volumen base total estimado de 27,792,912.27 m ³ /año. Asimismo, se localizan al menos 55 manantiales ú ojos de agua.
Vegetación	370 especies, 63 son endémicas
Fauna	90 especies de mamíferos y 23 endémicas; 253 de aves y 26 endémicas; 38 de reptiles y anfibios y 27 endémicas; Total de especies animales registradas: 381; endémicas: 76.
Clima	6 tipos climáticos con temperaturas medias anuales que van de los 6°C a los 22°C; y lluvias anuales que oscilan entre los 860 mm y los 1400 mm (CONABIO).
SISTEMA SOCIOECONÓMICO	
Habitantes en 2010	53,495 (INEGI, 2010)
Municipios	5: Los Reyes, Tancítaro, Peribán de Ramos, Nuevo Parangaricutiro, Uruapan (INEGI)
Grado de Marginación	Nuevo Parangaricutiro, Los Reyes, Peribán y Uruapan: Bajo ; Tancítaro: Alto CONAPO, 2005.
Localidades	171 (Censo 2010, INEGI)
Comunidades indígenas	6 (purhépechas): Angahuan, Zacán, San Juan Nuevo, La Escondida, San Ana Zirosto, Nuevo Zirosto (INEGI)
Ejidos	13: Aguacate del Poniente, Apo, Apúndaro, Arandían, Choritiro, Condébaro, Gildardo Magaña, La Majada, Páreo, San Frnacisco Peribán, Tancítaro, Zacándaro, Zirimóndiro (INEGI)
Producción aguacatera (miles de pesos)	1,916,203,064.8 (Con base en datos del OEIDRUS, 2007)
% de la producción total Municipal Regional	42.5% (Con base en datos del OEIDRUS, 2007)
% de la producción estatal	22.8% (Con base en datos del OEIDRUS, 2007)

Fuente: Elaboración propia con datos propios y de diversas fuentes ya señaladas en el cuadro.

Tomando como referencia lo anterior y atendiendo a su situación ambiental estratégica, no es de extrañar que al mismo tiempo el Tancítaro sea considerado por CONABIO como región terrestre prioritaria (<http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/terrestres.html>), y como área de importancia para las aves (<http://conabioweb.conabio.gob.mx/aicas/doctos/C-05.html>); además de ser considerado por CONAFOR como montaña prioritaria y por CONANP como área natural

protegida.

En cambio, sí es de extrañar el abandono oficial que ha tenido por parte de los gobiernos municipal, estatal y federal, pues no es sino hasta 2006 a través de CONAFOR que se realiza un esfuerzo por dotar al Pico de Tancítaro de un documento director para el manejo ambiental llamado “Programa de Manejo Operativo de la Montaña Prioritaria Pico de Tancítaro”.

Asimismo, es sorprendente el hecho de que solo dos comunidades (Santa Ana Zirosto y Angahuan), cuenten con su ordenamiento ecológico. Ninguna comunidad, ejido o localidad y tampoco ninguno de los municipios aledaños al Tancítaro cuenta hasta finales del 2010 por lo menos, con ningún ordenamiento ecológico que permitiera evaluar, diagnosticar y planear el uso del suelo. Más sorprendente aún es que ninguna autoridad involucrada en este tipo de regulaciones haya intentado antes promover los ordenamientos ya sea locales, municipales o regionales. Afortunadamente, a finales del 2008 la Secretaría del Medio Ambiente Estatal (SUMA) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) promovieron la realización de las dos primeras fases del ordenamiento ecológico de los municipios de Peribán de Ramos, Uruapan y Tancítaro, aunque desafortunadamente, ya no se ha continuado el desarrollo de las fases restantes de prospección y gestión que permitan terminar dichos ordenamientos. Finalmente, cabe resaltar que es apenas a finales del 2010 que la CONANP estatal ha decidido impulsar el programa de manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Pico de Tancítaro apoyándose en estudios y bases de datos generados por el CIECO y el CIGA de la UNAM..

Otro hecho que es muy relevante desde el punto de vista económico es que en el área de estudio se produce el 42.5% del valor de la producción aguacatera de los municipios de Nuevo Parangaricutiro, Peribán, Tancítaro y Uruapan (Los Reyes no tienen producción aguacatera en el área de estudio). Pero además, dicho valor constituye el 22.8 % de la producción estatal. La derrama económica estimada con base en los datos del boletín de la OEIDRUS (2007) alcanza la cifra nada despreciable de \$1,916,203,064.8 es decir, casi 2 mil millones de pesos en el 2006.

Si a todo lo anterior sumamos su innegable valor como montaña productora de agua, podemos decir que el Tancítaro debe ser considerado un punto de extraordinario valor ambiental y social el cual merece la atención local, municipal, estatal y federal en un marco de prioridades socio-ambientales.