



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Ecohidrología y servicios de regulación hidrológica en cuatro subcuencas de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas (RBSM) y sus aplicaciones para la gestión de recursos hídricos

Juan Carlos Rosito Monzón

Tesis Doctorales

www.eltallerdigital.com

UNIVERSIDAD de ALICANTE



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

TESIS DOCTORAL

Ecohidrología y servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en cuatro subcuencas de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas (RBSM) y sus aplicaciones para la gestión de recursos hídricos.

Autor:
Juan Carlos Rosito Monzón

2015

Agradecimientos

A los directores de la tesis Juan Rafael Sánchez Montahud y Juan Francisco Bellot Abad por su invaluable apoyo y asesoría.

A Sampurno Bruijnzeel, Bart Wickel y Heidi Asbjornsen por el soporte científico e instrumental a la investigación.

Al Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar de Guatemala, especialmente a Juventino Gálvez, Héctor Tuy y Gerónimo Pérez por su apoyo técnico y soporte institucional.

A World Wildlife Fund, Inc. (WWF) por su apoyo financiero. A Russell E. Train Education for Nature Education for Nature Porgram WWF

A la Fundación Defensores de la Naturaleza. Especialmente a Oscar Avalos por su invaluable apoyo en la recopilación de información de campo.

A Francisco López por su confianza.

Esta tesis se ha realizado en colaboración con el proyecto Balance hídrico y recarga de acuíferos en un gradiente seco-semiárido: la influencia del cambio climático y la Ecohidrología del bosque (CGL2011-30531-C02-01)

Resumen.

El agua es uno de los elementos básicos para la vida en la tierra y juega un papel fundamental en casi todas las actividades de la humanidad, en tal sentido se constituye en uno de los recursos naturales que más conflictos de uso genera. Además se ha evidenciado que su disponibilidad y distribución es muy sensible a los cambios en el clima que actualmente están ocurriendo a escala planetaria. Los sistemas sociales deben aprender a manejar adecuadamente estos recursos y, especialmente, los ecosistemas terrestres en donde se regula su flujo espacial y temporal, de tal manera que su gestión pueda constituirse en el hilo conductor del desarrollo sostenible y de la adaptación al cambio climático o al menos contribuir significativamente a reducir los desequilibrios entre la sociedad y su medio natural (Rosito, 2010; Custodio & LLamas, 2001; IARNA, 2009).

Las instituciones rectoras de administración de territorios y de los recursos naturales en Guatemala carecen de marcos políticos y legales adecuados para fomentar la sostenibilidad de los recursos hídricos. Esto a pesar de su importancia y de la evidencia contundente de su acelerado, incremental y severo deterioro tanto en su calidad, como en la disminución de la disponibilidad de agua para gran cantidad de población y de actividades económicas. Tampoco se cuenta con instrumentos normativos, técnicos o financieros adecuados o suficientes para abordar los retos que presenta la compleja gestión de los recursos hídricos (IARNA-URL, 2012) y de los recursos naturales asociados, tales como el bosque y el suelo. En tal sentido uno de los componentes fundamentales para ser atendido, y de manera urgente, es la conservación de los ecosistemas críticos para la regulación del ciclo hidrológico (IARNA, 2009; Bruijnzeel, Kapelle, Mulligan , & Scatena, 2010; IARNA-URL, 2012).

El fin principal del presente trabajo es la propuesta y aplicación de métodos innovadores, funcionales y con sustento ecológico e hidrológico para la comprensión de los procesos biofísicos inherentes a la ecohidrología regional. Así como para la categorización, conservación y monitoreo de los ecosistemas críticos por sus funciones de regulación hidrológica en Guatemala.

Esta tesis aporta la generación de conocimiento básico (experimental) y aplicado (útil para la generación de instrumentos de gestión), basándose en principios de la ecohidrología y ciencias afines. Esto se considera fundamental para llenar vacíos de información y análisis respecto a las interacciones entre los ecosistemas terrestres naturales y modificados, el ciclo hidrológico, el cambio climático y los sistemas sociales, económicos e institucionales.

El estudio se llevó a cabo, principalmente, en la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas (RBSM), la cual es considerada como un área protegida estratégica por la provisión de servicios ecosistémicos hidrológicos y su patrimonio natural. Fue gestionado y realizado durante el período comprendido entre los años 2006 y 2015. Las escalas de investigación fueron, de acuerdo a las necesidades y aplicaciones particulares; desde una escala muy detallada, tal como el implementado en la subcuenca Teculután, estudios comparativos de cuatro subcuencas representativas de las contrastantes condiciones hidroclimáticas de la RBSM y hasta el nivel de país, es decir, Guatemala.

Es destacable que esta iniciativa demostró adquirir aún mayor relevancia, en el marco del cambio climático que actualmente está enfrentando la humanidad, el cual, recientemente ha tenido efectos incrementales que se pueden calificar de muy alto nivel de riesgo, incluso catastróficos, para los subsistemas social, económico, institucional y ambiental en los

diferentes sitios de estudio (IARNA-URL, 2012; Defensores de la Naturaleza, 2004). A continuación se describen los acápite el trabajo desarrollado.

El Capítulo I del documento desarrolla **aspectos introductorios**, tales como un breve marco conceptual de la investigación y definición de términos que se emplearán a lo largo del trabajo global, definición de la problemática vinculada a la gestión de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en el área protegida de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas (RBSM) y Guatemala. Derivado de lo anterior se establecen los objetivos del trabajo.

En **el Capítulo II** se **delimita y describe el área de estudio**, mediante la recopilación y análisis de información ecohidrológica de la RBSM y su área de influencia. Se logra definir la importancia superlativa de la RBSM, especialmente por sus atributos ecosistémicos, especialmente de biodiversidad y aspectos hidrológicos, así como por sus interacciones con los sistemas sociales. La RBSM constituye el más grande y singular bosque montañoso continuo con condiciones de integridad ecológica que lo califican como un ecosistema “viable”, tanto en Guatemala como en gran parte de Mesoamérica (desde el Istmo de Tehuantepec hasta Istmo de Darién en Panamá).

Asimismo se describen de manera general tres regiones hidrográficas presentes en la RBSM. Estas son muy contrastantes y de interés para el estudio de los servicios ecosistémicos hidrológicos, dichas áreas son: barlovento, al norte, sotavento al sur y una región transicional al oeste de la cadena montañosa. Posteriormente se presenta la deducción de ecosistemas hidrológicamente homogéneos y se seleccionan cuatro subcuencas como unidades básicas de análisis para el estudio de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica. Estas subcuencas son, a la vez, representativas de las regiones hidrográficas definidas.

Otro aspecto importante es la integración de información básica y biofísica útil para la estimación de recarga hídrica por medio de métodos de balances hídricos de suelos y la consecuente comparación de las subcuencas.

Además se deducen ecosistemas diferenciados a través de gradientes altitudinales y de composición florística útil para el análisis y comprensión de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica. En tal sentido dicha clasificación ecohidrológica es fundamental para definir ecosistemas hidrológicamente homogéneos.

El Capítulo III: Ecohidrología y análisis biofísico de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en cuatro subcuencas de la RBSM. Este capítulo se subdivide en tres acápite y se describen a continuación:

III.I. Estudio de la recarga hídrica potencial en cuatro subcuencas mediante la aplicación del método de balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky. Este análisis consistió en la aplicación de un balance hídrico de suelos en las cuatro subcuencas definidas anteriormente. Inicialmente se recopiló e integró información cartográfica biofísica, tal como la geología, suelos y cobertura y uso del suelo. Dicha información se intersectó mediante el uso de sistemas de información geográfica. Derivado de esto se definieron sendas unidades de mapeo o, algunas veces nombradas como, unidades hidrológicas funcionales. A partir de esta información geográfica, para cada una de las unidades de mapeo, se procedió a recopilar en campo la infiltración básica y muestras de suelos para obtener, mediante análisis de laboratorio, los parámetros de granulometría, densidad

aparente y constantes de humedad, es decir, punto de marchitez permanente y capacidad de campo. Posteriormente se integró la información, incluyendo información climática anteriormente definida, realizando el balance hídrico de suelos a escala mensual y anual. Con la integración de estos datos se derivó la recarga hídrica potencial, la cual fue analizada comparativamente para las subcuenca definidas y se discuten algunas implicaciones del estudio en la gestión de la RBSM.

III.II. Estimación de la erosión hídrica de suelos en cuatro subcuenca, mediante el método de USLE. Se generó la información de erosión hídrica potencial de las cuatro subcuenca, mediante el uso de sistemas de información geográfica y la aplicación de la Ecuación Universal de Erosión de Suelos (USLE, por sus siglas en inglés). Para tal fin se empleó cartografía básica digital disponible en el medio institucional de Guatemala. Asimismo se procedió a realizar un análisis comparativo entre las regiones hidrológicas y se discuten algunas implicaciones del estudio en la zonificación interna de la RBSM.

III.III. Análisis de los servicios ecosistémicos hidrológicos en la Subcuenca Tecolután, mediante el monitoreo ecohidrológico detallado en dos años climáticos extremos.

La subcuenca Tecolután es la cuenca más grande y con mayor cantidad de usuarios de agua para riego y caudal en el sur (sotavento) de la RBSM. Bajo este contexto ha sido priorizada por diversos actores para explorar la posibilidad de implementar un esquema local de pago por servicios de regulación hidrológica y, en tal sentido, se considera importante la generación de información ecohidrológica que sustente científicamente dicha iniciativa.

Se desarrolló un monitoreo ecohidrológico para la integración de datos de caudales y clima (especialmente precipitación y temperatura) con un mayor grado de detalle al ya presentado anteriormente. Estos datos fueron recopilados durante dos años hidrológicos extremos 2009-2020 (muy seco) y 2010-2011 (muy húmedo). El objetivo principal fue caracterizar los procesos hidrológicos en los tres principales ecosistemas diferenciados a través de un gradiente altitudinal. Basado en lo anterior se procedió a conceptualizar y parametrizar los servicios ecosistémicos hidrológicos.

Esta investigación, innovadora en su planteamiento ecohidrológico y con datos de años climáticos extremos, se constituyó en la base para la definición biofísica de los servicios de regulación hidrológica. Dichos servicios pueden, al ser demostrados científicamente, ser objeto de negociación (compra-venta), ya que establece un producto concreto de los ecosistemas (definido temporal y espacialmente), así como su demanda y oferta de un servicio específico. Cabe destacar que los resultados obtenidos son también aplicables a otras cuencas ubicadas en la región de sotavento de la RBSM y logra fortalecer iniciativas existentes respecto a esquemas de valoración de servicios ambientales en Guatemala.

El Capítulo IV presenta el estudio denominado: **Evaluación de servicios ecosistémicos hidrológicos de cuatro subcuenca de la RBSM mediante la aplicación de sistemas de contabilidad ambiental y económica integrados (SCAEI).** El fin principal de esta investigación fue implementar un análisis comparativo de las cuatro subcuenca definidas para la RBSM, en función de las características de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica y sus interacciones con el sistema socioeconómico en su área de influencia.

En síntesis esta investigación utilizó de referencia, además del aprendizaje mostrado en los acápite anteriores; los conceptos, métodos y marcos analíticos propuestos en los Sistemas de Contabilidad Ambiental y Económica Integrados (SCAEI), especialmente los

desarrollados para el análisis de los recursos hídricos (SCAE-Agua) y los ecosistemas (ESCAE-Ecosistemas). Esto demostró ser muy útil para evidenciar y visibilizar la importancia superlativa de la RBSM. Al mismo tiempo se define de una manera objetiva y balanceada aquellos sitios de mayor interés y que ofrecen mayores beneficios a los sectores social, económico y ambiental.

En el **Capítulo V** se presenta el estudio denominado: “**Clasificación de unidades territoriales de gestión hídrica (microcuencas) de acuerdo al análisis sistémico de los servicios de regulación hidrológica**”. Esta investigación se basó en la aplicación de un enfoque sistémico, es decir, que integra procesos biofísicos y aspectos sociales. Analiza los recursos hídricos desde su ingreso en forma de precipitación, abastecimiento y regulación por parte de los ecosistemas terrestres; así como la derivación y utilización por parte de la sociedad.

Para este fin se abordaron aspectos conceptuales del sistema (país o cuenca), atributos geográficos, ecológicos, hidrológicos y su interacción con el componente social, especialmente, la provisión de servicios de agua y regulación hidrológica. Se definió como unidad básica de análisis la microcuenca, la cual reúne características biofísicas adecuadas para su análisis y se considera útil para la gestión de los recursos hídricos.

Dicho análisis se llevó a cabo de tal manera que, de una forma balanceada y objetiva, se lograran categorizar microcuencas que cubren el 16% del territorio nacional en donde se capta el 26% de la lluvia neta, y que, además, son estratégicas para la sociedad por satisfacer requerimientos ambientales, así como de abastecimiento de recursos hídricos para uso consuntivo y no consuntivo. Otro aspecto relevante fue el análisis de la importancia de las microcuencas priorizadas en la gestión de recursos hídricos y en la adaptación al cambio climático.

Como parte de las recomendaciones de este trabajo, derivadas del conocimiento ecohidrológico generado en esta investigación, se proponen las directrices generales y alcances de un sistema de seguimiento y evaluación de los sitios definidos como prioritarios para la regulación hidrológica en Guatemala, en el marco del cambio climático.

El **Capítulo VI** presenta las **conclusiones**. En éste acápite se integran las conclusiones y lecciones aprendidas con la implementación del mismo. Se concluye que fue válido, adecuado y consistente la propuesta de conceptos, métodos e indicadores ecohidrológicos para la generación de conocimiento, monitoreo y gestión de los recursos hídricos y de los ecosistemas naturales que brindan servicios de captación y regulación hidrológica.

Integrando todo el conocimiento adquirido se estableció que los métodos empleados, ya sea a escala general con métodos e información accesible en el medio institucional de Guatemala, o a escalas muy detalladas, como el caso de la subcuenca Tecolután, fueron útiles para conocer la distribución, disponibilidad y sensibilidad al cambio climático de los recursos hídricos y los respectivos ecosistemas que regulan el ciclo hidrológico.

Partiendo de este conocimiento se logró evidenciar las interacciones entre los diferentes ecosistemas y subcuencas hidrográficas con los sistemas sociales y económicos, mediante la utilización de métodos de contabilidad ambiental aplicados a nivel local. Asimismo se logró clasificar microcuencas prioritarias para la gestión tanto de los recursos hídricos como de la adaptación al cambio climático.

Índice

Resumen	v
Capítulo I. Introducción.	1
Capítulo II. Área de estudio. Determinación de ecosistemas y subcuenca representativas de la RBSM como unidades básicas de análisis ecohidrologico.	17
Capítulo III. Ecohidroología con énfasis en el análisis biofísico de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en cuatro subcuenca de la RBSM.	83
III.I. Estudio de la recarga hídrica potencial en cuatro subcuenca de la RBSM mediante la aplicación del método de balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky.	85
III.II Estimación de la erosión hídrica de suelos en cuatro subcuenca de la RBSM, mediante el método USLE.	131
III.III Análisis de los servicios ecosistémicos hidrológicos en la Subcuenca Teculután, mediante el monitoreo ecohidrológico detallado en dos años climáticos extremos.	153
Capítulo IV. Evaluación de servicios ecosistémicos hidrológicos de cuatro subcuenca de la RBSM mediante la aplicación de Sistemas de contabilidad ambiental y económica integrados (SCAEI).	211
Capítulo V. Clasificación de unidades territoriales de gestión hídrica (microcuenca) de acuerdo al análisis sistémico de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica, Guatemala.	247
Capítulo VI. Conclusiones	323

Capítulo I:

Introducción

Contenido

1	Presentación	5
1.1	La Hidrología, sus ramas y ciencias afines.....	5
1.2	Ecohidrología	6
1.3	La cuenca hidrográfica.....	8
1.4	Recarga hídrica.....	8
1.4.1	Acuíferos	9
1.4.2	Zona de recarga natural.....	9
1.4.3	Descarga natural.....	9
1.4.4	Manantiales.	10
1.5	Cobertura del suelo y el agua.....	10
1.6	Servicios ecosistémicos hidrológicos.....	11
1.7	Síntesis de la problemática de los recursos hídricos y de la gestión de los ecosistemas de regulación hidrológica en Guatemala.....	11
2	Objetivos de la investigación	13
2.1	Objetivo general	13
2.2	Objetivos Específicos.	13
3	Bibliografía	14

Lista de Figuras

Figura 1. Ciclo hidrológico.....	6
----------------------------------	---

1 Presentación

Existe una creciente preocupación por el estado de la biodiversidad y del agua en todo el mundo (Adger, 2006; Bruijnzeel S. , 1999; CATIE, 2009; Custodio & LLamas, 2001), de tal manera que se ha incrementado la necesidad de articular las formas en que ambos pueden ser la conservación efectiva. Uno de los retos más importante es lograr la conservación al mismo tiempo satisfacer las demandas de producción de los ecosistemas agrícolas, que cada vez se expanden más de forma paralela a la población (Martin, 2003). En la actualidad la atención principal recae sobre la labor de nuevas ciencias o nuevas aplicaciones de la ecología y la geografía (Mathewson, 2004).

Todas las sociedades, especialmente en países en desarrollo, necesitan para su subsistencia y desarrollo mejorar su capacidad de adaptación para enfrentar tanto el cambio climático presente como el futuro, el cual se prevé sin precedentes ni experiencia suficiente para hacerle frente con los conocimientos actuales. El principal desafío, es promover la capacidad de adaptación en el contexto de la competencia de los objetivos de desarrollo sostenible (Adger, Huq, Brown, Conway, & Hulme, 2003; Adger, 2006). La gestión de ecosistemas críticos para la captación y regulación hidrológica se constituye, al tratarse de agua, de un derecho fundamental y en una obligación de los Estados.

Ante estas necesidades es impostergable la aplicación de métodos científicos para la generación eficiente de información básica para la formulación de instrumentos estratégicos para fundamentar la conservación y gestión sostenible de los recursos críticos como el agua así como de los recursos naturales vinculados, tales como los ecosistemas forestales y el suelo. A continuación se desarrolla la base conceptual básica que acompaña el planteamiento e implementación de las investigaciones que se describen posteriormente.

1.1 La Hidrología, sus ramas y ciencias afines.

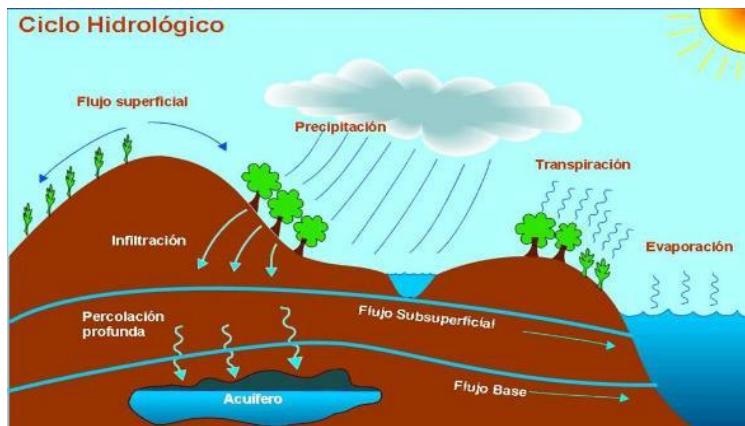
La Hidrología es la ciencia que versa sobre el agua de la tierra, su existencia, incidencia, circulación y distribución, sus propiedades químicas y físicas, así como su influencia en el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos (Linsley, 1998; Monslave, 2008).

En este sentido el término de *Ciclo Hidrológico* (Figura 1) es un punto útil, aunque académico, desde el cual comienza el estudio de la Hidrología. El ciclo hidrológico se define como un complejo sistema de circulación continua, a gran escala, que asegura el bombeo, destilación y transporte del agua en todas sus formas. (Linsley, 1998). El ciclo hidrológico se visualiza iniciándose con la evaporación del agua de los océanos. El vapor de agua resultante es transportado por masas móviles de aire. Bajo condiciones adecuadas el vapor de agua se condensa para formar nubes, las cuales, a su vez, pueden transformarse en precipitación. Esta precipitación se dispersa en la tierra de diversas maneras la mayor parte de ésta es retenida temporalmente en el suelo y regresa eventualmente a la atmósfera por evaporación o transpiración de las plantas. Otra porción del agua que se precipita viaja sobre la superficie del suelo hasta alcanzar drenajes naturales de las corrientes. La porción restante penetra más profundamente en el suelo para conformarse en agua subterránea. Bajo influencia de la gravedad, tanto la escorrentía superficial como el agua subterránea se mueven cada vez hacia zonas más bajas y con el tiempo pueden incorporarse nuevamente a los océanos

El estudio de cada una de las diferentes fases del ciclo hidrológico ha derivado de la Hidrología General, algunas ciencias específicas, tales como Hidrogeología o Hidrología Subterránea, cuando se estudia el comportamiento del agua en el suelo o subsuelo. Hidrología Superficial que se centra en los fenómenos acaecidos en la superficie de las tierras emergidas.

La Hidrología Forestal trata de las relaciones entre el agua, el suelo, la morfología del territorio y la vegetación, dentro de una unidad de estudio denominada cuenca o vertiente, resaltando el papel de la cubierta vegetal y especialmente el bosque, como reguladora de los procesos que se producen en dicha unidad. En este contexto la hidrología forestal se ocupa del comportamiento del ciclo hidrológico bajo el ámbito de los ecosistemas forestales, así como la dinámica dentro de estos ecosistemas producto de su manipulación (Linsley, 1998; Herrera, 1995).

La Hidrología Forestal se engloba principalmente dentro de la hidrología superficial y está muy relacionada con la Hidrología subterránea y se complementa directamente con otras ciencias como: la Meteorología y Climatología, sobre todo en los aspectos que afectan el balance entre precipitación y evapotranspiración de una región. También se vincula a la Edafología y Geología, en lo que respecta a los procesos de infiltración, percolación, escorrentía superficial, etc., así como la Botánica, Fisiología y Ecología Vegetal y otras ciencias afines, así como, Silvicultura y Ordenamiento de cuencas (Linsley R. J., 1988; Martinez, 1998)



Tomado de <http://www.infoiarna.org.gt/quatequa/img/ciclohid.jpg>

Figura 1. Ciclo hidrológico

Las fases principales del ciclo hidrológico son:

- Evaporación del suelo, plantas y océanos.
- Formación y desplazamientos de nubes y niebla.
- Condensación del agua y precipitación en forma de lluvia, nieve, granizo, etc.
- Escorrentía superficial, sobre el suelo.
- Infiltración, en el perfil del suelo.
- Percolación a estratos más profundos.
- Flujo subterráneo y retorno a la superficie (manantiales y pozos).
- Formación de corrientes superficiales, como ríos y arroyos.
- Descarga en lagos, océanos y mares.
- Evaporación....y repetición del ciclo.

1.2 Ecohidrología

Ante la disminución de la disponibilidad de los recursos hídricos en una escala global, la comunidad científica internacional ha hecho hincapié en la necesidad de nuevas soluciones. El desarrollo de esta ciencia se ha gestado partiendo de dudas fundamentales, tal como ¿Por qué los métodos actuales de gestión de recursos hídricos no proporcionan resultados satisfactorios? En este sentido resulta evidente que la actividad humana ha afectado gravemente los principales componentes regulatorios del ciclo del agua - la biota -

especialmente durante los últimos dos siglos. Asimismo, la gestión del agua ha estado dominada por un enfoque mecánico-hidráulico, cuando en realidad, el ciclo del agua a escala de cuencas fluviales es el resultado de la evolución biogeoquímica (Zalewski, 2000; Janauer, 2000).

La ecohidrología, es el estudio de las interrelaciones funcionales entre la hidrología (ciclo hidrológico) y la biota (ecología) a escala de un sistema, generalmente la cuenca . Este se constituye en un nuevo enfoque para lograr la sostenibilidad y gestión más adecuada del agua. Se basa en tres principios: a) integrar y comprender las interrelaciones del agua y la biota a escala de cuenca; b) entender que evolutivamente se ha establecido una resistencia de los organismos vivos al estrés, sobre todo hídrico y climático, a partir de las cuales pierden su capacidad de resiliencia; y c) uso de propiedades de los ecosistemas como instrumentos de gestión (medición de eficacia de gestión medida por la diversidad biológica, la calidad del agua y cantidad) (Van Dijk, 2003; Zalewski, 2000).

Uno de los principios fundamentales del desarrollo sostenible es que los ecosistemas presenten homeostasis (Zalewski, 2000), es decir la propiedad de regulación y estabilidad interna de un sistema. La homeostasis en un sistema (planta - ciclo hidrológico) es importante para la supervivencia del humano, debido al estado de sobreexplotación y degradación de la estructura biótica, los cuales en muchos casos han perdido su capacidad de resiliencia.

El ecosistema global es el resultado de la evolución biogeoquímica, por lo tanto, la comprensión procesos biológicos en muchas escalas en el medio ambiente abiótico es la clave para lograr la sostenibilidad ante el aumento exponencial de la población humana. Esta comprensión es fundamental para el control y la restauración ecológica y de la propuesta de procesos que mejoren el ecosistema en sus propiedades de resistencia y resiliencia. En este contexto, la degradación de los ecosistemas de agua dulce, y por tanto de los recursos hídricos, tiene dos facetas: la contaminación, y la interrupción de los ciclos del agua y nutrientes. La contaminación puede ser sustancialmente eliminada con la utilización de tecnología adecuada. La degradación del agua es mucho más compleja, ya que se alteran dramáticamente los ciclos de nutrientes establecidos evolutivamente, por lo general relacionadas con la destrucción de la estructura biótica dentro de la cuenca y dentro el sistema de agua dulce. Mejorar la comprensión de los procesos moleculares a escalas de cuenca, crea la base necesaria para el control de la disponibilidad y regulación de la dinámica de nutrientes y agua. En última instancia la mejora de la resistencia o la resiliencia de los ecosistemas acuáticos al impacto humano. Por lo tanto, mejorar el conocimiento integral entre hidrología y ecología ha sido fundamental a la utilización de propiedades de los ecosistemas como herramientas de gestión para la mejora y seguridad de los recursos hídricos y el mantenimiento de la biodiversidad (Janauer, 2000) (Zalewski, 2000).

El planteamiento de hipótesis/objetivos de trabajo de estudios de ecohidrología ayuda a aclarar aún más el concepto y aplicaciones de esta, relativamente nueva ciencia. A continuación se presentan una adaptación de la propuesta de Zalewski para este fin (Zalewski, 2000; Van Dijk, 2003; Janauer, 2000):

- a) Lograr la comprensión profunda del régimen hidrológico [disponibilidad de agua] y la distribución de la biota en sistemas de corrientes de agua [cuenca].
- b) El enfoque ecohidrológico puede ser una herramienta hacia la utilización sostenible de los recursos hídricos por su contribución en la mejora de la capacidad de almacenamiento temporal de corrientes fluviales.

- c) Estimar la vulnerabilidad de los ríos, embalses, estuarios, etc. que dependen del patrón estacional del ciclo hidrológico y procesos bióticos, los cuales pueden ser modificados [o adaptados] por la influencia de la sociedad.
- d) Definir cargas y flujos de nutrientes de sistemas acuáticos, los cuales dependen en gran medida de las perturbaciones inducidas por el hombre y de los sistemas bióticos.
- e) Definir la intensidad y la duración de las inundaciones, las cuales pueden ser modificadas por características biológicas y manejo de las áreas de riveras de río, que a su vez son modificados por el régimen hidrológico.
- f) Utilización de información ecológica obtenida a escalas menores inferir procesos hidrológicos a escalas mayores.
- g) Comprender las interacciones planta-ciclo hidrológico para mejorar la capacidad predictiva del régimen hidrológico como una base para la gestión rentable de los recursos hídricos y paisajes.
- h) Optimización de la estructura de las zonas de ecotono, como zonas ribereñas de amortiguación, los humedales, o las llanuras de inundación como una herramienta importante para la reducción de la transferencia de nutrientes desde el cuenca del río aguas abajo y otros beneficiarios
- i) Los índices correspondientes a la planificación predictiva y gestión de los recursos hídricos debe basarse en los datos locales e inferencias hidrológicas de gran escala procesos.

1.3 La cuenca hidrográfica.

Se denomina Cuenca o Vertiente a una zona de la superficie terrestre en la cual el agua procedente de la precipitación caída sobre ella, se dirige hacia un mismo punto de salida (Martinez, 1998). Es un territorio en el que las aguas escurren a través de una red de cauces, y confluyen en un mismo punto (lago, corriente, acuífero), formando una unidad autónoma o diferenciada de otras. Asimismo, es un territorio conformado como una unidad, física, natural, básica de la regulación del agua, donde el agua de lluvia es captada y desalojada o depositada en un almacenamiento natural por un sistema de drenaje definido por la topografía, iniciando en el parte aguas; adicionalmente, admite articular procesos de gestión que permiten alcanzar el desarrollo sustentable (Monslave, 2008; Linsley R. J., 1988).

Es una zona delimitada topográficamente que desagua mediante un sistema fluvial, es decir la superficie total de tierras que desaguan en un cierto punto de un curso de agua o río. Constituye una unidad hidrológica descrita como una unidad físico-biológica y también como unidad socio-política para la planificación y ordenación de los recursos naturales (FAO, 1992).

1.4 Recarga hídrica.

Se define como el proceso donde el flujo de agua desciende en el suelo, hasta alcanzar el nivel freático, incrementando el agua almacenada. Es decir, es el volumen de agua que entra en un embalse subterráneo durante un período de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua. Es equivalente a la infiltración eficaz o infiltración profunda. Esta puede ser directa (infiltración de lluvia) o lateral (aporte de otras áreas o cuencas) (Custodio & LLamas, 2001).

La recarga puede ser natural cuando se produce por infiltración de la precipitación pluvial o de un curso de agua (ríos y lagos) o inducida debido a las actividades humanas, como riego y urbanización. También se divide según el tipo de estimación en: recarga actual que es el

volumen de agua que alcanza el nivel freático; y recarga potencial que es el volumen de agua, que puede tomar diferentes destinos como evapotranspiración, cambio de humedad en la zona insaturada del suelo, descarga a cursos de agua y alcanzar reservorios de agua subterránea (Custodio & LLamas, 2001).

La capacidad de infiltración de los suelos desempeña un papel fundamental en los procesos de regulación y escorrentía como respuesta a una precipitación dada en una cuenca, lluvias de iguales intensidades, pueden producir caudales diferentes. Su papel es fundamental también en el estudio de la recarga de acuíferos. Existen muchos factores que controlan la infiltración en un área determinada, por lo que su estimación confiable es bastante difícil y es imposible obtener una relación única entre todos los parámetros que la condicionan. Los principales factores que afectan la infiltración en una cuenca pueden agruparse en los siguientes grupos: Características físicas del suelo que incluye textura, estructura y condición del suelo (compactación y contenido de humedad). Suelos con texturas gruesas, poco grado de estructuración y compactación y con un bajo contenido de humedad, tienen una mayor capacidad de infiltración que los suelos con características diferentes. Los otros grupos a considerar son: La vegetación, características de la lluvia, pendiente del terreno, estratificación, la temperatura del agua y suelo y el estado físico-químico del mismo (Custodio & Llamas, 2001).

1.4.1 Acuíferos

Según Custodio y Llamas, es la capa o formación geológica donde el agua circula y se almacena, y que puede ser utilizada por el hombre en cantidades económicamente significativas (Custodio & Llamas, 2001). Lesser, agrega que esta agua, en la mayoría de casos sólo puede ser aprovechada a través de pozos.

De acuerdo a Herrera, los diferentes acuíferos conocidos según el tipo de flujo, la presión del agua, la extensión y continuidad de saturación, son:

Por el tipo de flujo: acuíferos en medios porosos (flujo en medios porosos) y acuíferos en medios fracturados o consolidados (flujo fisural). En base a la presión del agua y relaciones de conductividad hidráulica del acuífero (capa sobreyacente): acuífero libre o freático (no tienen capa confinante sobreyacente), acuífero semilibre (se presentan capas o lentes confinantes en algunas partes), acuífero semiconfinado (tiene un acuitardo como capa sobreyacente), y acuífero confinado (tiene dos capas confinantes, superior e inferior).

Y según la extensión y continuidad de saturación, se mencionan: acuífero colgado y acuífero regional o principal (Herrera, 1995).

1.4.2 Zona de recarga natural.

De acuerdo a Lesser, son las áreas ubicadas en topografías elevadas y en suelos permeables, que facilitan la infiltración y descenso del agua hacia los reservorios de agua subterránea (acuíferos). Y esta infiltración puede producirse no sólo por las aguas de lluvia, sino también por las aguas que circulan a través de los arroyos o corrientes. (Lesser, 1994).

1.4.3 Descarga natural.

Según Custodio & Llamas, 2001, es el volumen de agua que en un determinado tiempo sale de la zona de almacenamiento a través de los manantiales cuando la zona saturada queda cerca de la superficie terrestre. Lesser, indica que la descarga natural de los acuíferos,

además de realizarse por los manantiales, se efectúa por las corrientes del río (efluente). (Custodio & Llamas, 2001)

1.4.4 Manantiales.

Vargas (Citado por Custodio y Llamas, 2001), indica que el manantial es una fuente natural de agua, que surge a la superficie del terreno, en donde el nivel de saturación del agua corta la superficie topográfica. Los manantiales son los desagües o aliviaderos por los cuales sale la infiltración o recarga que reciben las zonas de almacenamiento de agua y representan al no utilizar bombeo, ahorro de energía y recursos económicos. (Custodio & Llamas, 2001).

1.5 Cobertura del suelo y el agua.

El microclima que crea el bosque en relación al suelo raso es: menos luminoso, con reducción de la luminosidad hasta un 90 %; menos caluroso, con disminución de unos 4°C en la temperatura media anual; menos ventoso, con la reducción de la velocidad del viento hasta a la cuarta parte; más húmedo, con un aumento en el orden del 10 %. Este microclima hace que algunos factores ecológicos no actúen como limitantes y en consecuencia, contribuye sustancialmente a la estabilidad del sistema y propiciar la infiltración de agua en el suelo (Martinez, 1998).

Para conocer el impacto del bosque en la captación y regulación hidrológica (Figura 2) es recomendable analizarlo por medio del balance hidrológico a nivel de cuenca. El balance hidrológico de una cuenca en un tiempo determinado está dado por el principio de conservación de masa o ecuación de continuidad:

$$\text{Entrada} - \text{salida} = ds/dt \text{ (velocidad de almacenamiento)}$$

En un período largo el tiempo ds tiende a cero, por lo tanto, *Entradas* = *Salidas*, es decir:

$$P \text{ (precipitación)} = I \text{ (infiltración)} + E \text{ (escorrentía)} + ET \text{ (evapotranspiración)}$$

En cuanto a la precipitación el ecosistema boscoso puede llegar a influir en el origen de la misma, causa intercepción (y posterior evaporación) de la lluvia antes de llegar al suelo. Al bosque se le atribuyen funciones de importante captación en algunos ecosistemas de las denominadas precipitaciones ocultas, de rocío, escarcha y precipitaciones horizontales. Asimismo, se ha evidenciado que el bosque influye en la infiltración del agua en el suelo aumentándola. El bosque otorga al suelo una mayor permeabilidad, especialmente por modificar las propiedades físicas de la parte superficial (Brujinzeel, 1990; Custodio & LLamas, 2001).

El papel fundamental que desempeñan los bosques sobre la escorrentía es la de modificar su forma en el agua superficial y disminuir la cantidad de agua que accede a los cauces, disminuyendo drásticamente las aportaciones superficiales y aumentando las subterráneas. Este es el aporte más importante de un bosque a la “producción hídrica” de una cuenca dada y sobre todo es más evidente e importante en aquellas áreas de aptitud preferentemente forestal, es decir, que presenten altas pendientes, poca profundidad, o en general, alta susceptibilidad a la erosión química o física. De acuerdo a muchas referencias la evapotranspiración constituye una de las principales salidas de agua del sistema. En nuestro medio se estima que alcanza del 40 al 60 % de las precipitaciones totales anuales. En este sentido el bosque se convierte en el mayor consumidor de agua en el ecosistema (García, 2007; Brujinzeel, 1990; Martinez, 1998) .

1.6 Servicios ecosistémicos hidrológicos.

A continuación se aborda las definiciones básicas de los servicios ecosistémicos hidrológicos. Debido a que las cuencas hidrográficas conectan y abarcan ecosistemas terrestres, de agua dulce, se dan lugar una gran variedad de fenómenos relacionados con el ciclo hidrológico, derivados de los cuales la sociedad puede acceder, por ejemplo, a suministro y purificación de agua potable, la provisión de hábitat que salvaguarda la pesca y la diversidad biológica, el secuestro de carbono (que ayuda a mitigar el cambio climático), así como a sitios para desarrollar recreación y turismo. En el lenguaje de la economía ecológica, las cuencas son activos naturales que proporcionan un flujo de bienes y servicios a la sociedad. Sin embargo en los mercados comerciales, generalmente, el valor de estos servicios por lo que sólo es internalizado parcialmente (Postel & Thompson, 2005).

El hecho de no incorporar adecuadamente el valor de los recursos naturales y servicios que se derivan de las cuencas hidrográficas repercute en un uso y manejo de tierras de cuencas inadecuado y, a su vez, produce la reducción de los beneficios netos que las sociedades obtienen. Cambios de uso del suelo, por ejemplo, de una cobertura original de bosque a tierras de cultivo, y de tierras de cultivo a lo urbano -asentamientos- disminuye drásticamente la capacidad de los suelos y de una cuenca a realizar su labor ecológica.

La capacidad de las cuencas en buen estado de conservación, para regular el flujo del agua y purificar el agua potable es uno de sus servicios más tangibles y valiosos. La pérdida progresiva de estos servicios deriva en riesgos de daños a la salud humana mediante el consumo de agua de baja calidad, el aumento de los costos del agua, en particular, y la menor productividad de los cultivos y la producción hidroeléctrica causa la disminución o mala regulación de los flujos durante la estación seca.

La falta de información confiable, tanto biofísica como socioeconómica, sobre los vínculos entre los usos del suelo en una cuenca hidrográfica y sus correspondientes servicios hidrológicos que proporcionan complica la tarea de diseñar instrumentos y/o mecanismos institucionales adecuados para la protección de éstos sitios (Postel & Thompson, 2005).

1.7 Síntesis de la problemática de los recursos hídricos y de la gestión de los ecosistemas de regulación hidrológica en Guatemala.

Se ha evidenciado que Guatemala posee abundancia de agua con más de 35 cuencas importantes que se originan principalmente en las partes altas de las diferentes cadenas montañosas. La precipitación promedio anual es de 2,000 mm. Debido a las condiciones climáticas del país se cuenta con la cantidad de agua necesaria para cubrir la demanda. Sin embargo, no hay un buen manejo de los recursos hídricos para mantener los requerimientos de suministro de agua. Se evidencian severos déficits hídricos en algunas regiones geográficas y en ciertas épocas del año (época seca especialmente marzo y abril). Los recursos de agua se ven agotados por el aumento constante de la demanda, la cual se ha desarrollado hasta llegar a una situación crítica. Este agotamiento está asociado, en parte, a una distribución desigual de la población. Las áreas más densamente pobladas son las regiones donde la disponibilidad de agua es baja debido a la altura o a déficits de lluvia. La ciudad de Guatemala, Quetzaltenango y muchos poblados del oriente del país son un ejemplo típico. Lo contrario ocurre donde los recursos de agua son abundantes (Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América , 2000).

La escasez de agua es un problema muy serio, aunque el país tenga un promedio anual de lluvia de 2,000 milímetros, en la mayor parte del territorio se evidencia una alta estacionalidad,

con la ocurrencia de una época seca (sin lluvias significativas) de cinco a seis meses en promedio. En síntesis la distribución desigual de la población y de la lluvia, sumada al manejo ineficiente de los recursos de agua disponibles, son las causas principales de los problemas en este tema.

No existe una autoridad nacional para regular el aprovechamiento y el suministro de agua en el país. Cada municipalidad es responsable por su propio suministro y por mantener la calidad del agua. Si el agua no cumple con las normas de calidad, la municipalidad está obligada a corregir el problema.

Como resultado de la disminución en el suministro de agua superficial y debido a la contaminación, se confía en el agua subterránea para que proporcione más agua en el futuro. Sin embargo, muchos acuíferos poco profundos se están contaminando debido derivado de la contaminación ambiental, esto está causando la dependencia de pozos y fuentes de agua más profundas para proporcionar agua potable. Los cuales en algunos casos como en la ciudad capital, en la costa sur, en el altiplano occidental y en los valles secos del oriente se están agotando rápidamente.

En tal sentido se considera fundamental dar soporte técnico a la definición y gestión de sitios críticos para mantener la regulación hidrológica de los ecosistemas, tal como está contemplado en la Ley Forestal de Guatemala (Dto. 101-96) y Ley de Áreas Protegidas. Es destacable que estos instrumentos legales han sido históricamente los que mayor aplicabilidad han mostrado, de acuerdo al contexto institucional de Guatemala.

2 Objetivos de la tesis

2.1 Objetivo general

Analizar las interacciones entre el ciclo hidrológico, los ecosistemas y la sociedad en la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas (RBSM) como base para la gestión de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica.

2.2 Objetivos Específicos.

1. Analizar atributos biofísicos hidrológicos en cuatro subcuencas representativas de las condiciones de sotavento, barlovento y zona transicional en la (RBSM).
2. Parametrizar y conceptualizar los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en la subcuenca Teculután en años climáticos contrastantes.
3. Evaluar los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en cuatro subcuencas representativas de la RBSM.
4. Clasificar con un enfoque sistémico las unidades territoriales de gestión (microcuencas) de servicios ecosistémicos de captación y regulación hidrológica en Guatemala.

3 Bibliografía

- Adger, N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(1), 268–281.
- Adger, N., Huq, S., Brown, K., Conway, D., & Hulme, M. (2003). Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in Development Studies* 3,3 (2003) pp. 179–195, 179-195.
- Brujinzeel. (1990). *Hydrology of moist tropical forest effects of conversion. A State of knowledge review.*. Amsterdam: UNESCO, International Hydrological Programme.
- Brujinzeel, S. (1999). Hydrology of Tropical Montane Cloud Forest: a reassessment. En I. H. Programme, *Second International Colloquium on Hydrology and Water Management in the Humid Tropics* (pág. 27). Panama: UNESCO.
- Brujinzeel, S. (2008). Demonstrating hydrological benefits from tropical reforestation efforts. (pág. 31). Amsterdam: Vrije Universitet.
- Brujinzeel, S., Kapelle, M., Mulligan , M., & Scatena, F. (2010). Tropical montane cloud forests: state of knowledge and sustainability perspectives in a changing world. En S. Brujinzeel, F. Scatena, & L. Hamilton, *Tropical montane cloud forests* (pág. 749). Cambridge: Cambridge University Press.
- CATIE. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica*. Turrialba: CATIE-ASDI.
- Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América . (2000). *Evaluación de Recursos de agua de Guatemala*. Mobile: United States Southern Command.
- Custodio, B., & LLamas, E. (2001). *Recarga Hídrica*. Madrid: Mundiprensa.
- Defensores de la Naturaleza. (2004). *Programa de investigación de recursos hídricos de la Reserva de la biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Defensores de la Naturaleza.
- Dinerstein, E. O. (1995). *A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean*. Washington D.C.: The World Bank and WWF.
- Dix, M. A. (1997). Centres of Plant Diversity: A Guide and Strategy for Their Conservation. Volume 3: The Americas. En S. H.-M.-L. Davis, *Centres of Plant Diversity: A Guide and Strategy for Their Conservation. Volume 3: The Americas*. Cambridge, England: IUCN Publication Unit.
- FAO. (1992). *Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Guía FAO Conservación*. México: FAO.
- Fundación Defensores de la Naturaleza. (2003). *III Plan Maestro 2003-2008 de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Fundación Defensores de la Naturaleza.
- Gonzales, O. (1999). *Estudio cualitativo de la composición forestal remanente entre 400 y 1200 msnm, de la subcuenca Río Raxón, Tzunum, Reserva de biosfera Sierra de las Minas, Panzos, Alta Verapaz*. Guatemala: universidad del Valle.
- Herrera, I. (1995). *Manual de Hidrología*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

- IARNA. (2009). *Sistema Cuentas Ambientales y Económicas Integrado. Cuentas Integrada de Tierras y Ecosistemas*. Guatemala: IARNA.
- IARNA-URL. (2010). *Perfil ambiental de Guatemala*. Guatemala : IARNA.
- IARNA-URL. (2012). *Perfil ambiental de Guatemala* . Guatemala : IARNA URL.
- Janauer, G. (2000). Ecohydrology: fusing concepts and scales. *Ecological engineering*, 9-16.
- Linsley. (1998). *Hidrología para ingenieros*. Distrito federal, Mexico: McGaraw-Hill.
- Loening, L., & Markussen, M. (2003). *Pobreza, Deforestación y Pérdida de la biodiversidad en Guatemala*. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen.
- Martinez, N. y. (1998). *Hidrología Forestal*. Valladaolid: Universidad de Valladolid.
- Mathewson, K. (2004). A century and counting: Geographical research on Guatemala a historical perspective. (L. S. Department of Geography and Anthropology, Ed.) *Geoforum*.
- Monslave, G. (2008). *hidrología en la ingeniería*. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.
- Naciones Unidas. (2010). *Sistema de cuentas Ambientales y Económicas para el Agua (SCAE-Agua)*. New York: ONU.
- OMM, Organización meteorológica Mundial . (1994). *Guía de prácticas hidrológicas*. Washington: Organización Meteorológica Mundial.
- Postel, S., & Thompson, B. (2005). Watershed protection: Capturing the benefits of nature's water supply services. *Ecological Forum*, 95-108.
- Rosito, J. C. (2010). *Monitoreo hidrológico en la subcuenca Tecolután / proyecto PESH*. Guatemala: WWF-CARE/IARNA.
- Sandoval, I. (1989). *Principios de riego y drenaje*. Guatemala: Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- WMO. (2006). *Technical regulations: Hydrology*. New York: World Meteorological Organization .
- WMO. (2012). *El Tiempo el Clima y el Agua*. Gineva : OMM.

CAPITULO II

Área de estudio.

**Determinación de ecosistemas y subcuencas representativas de la RBSM
como unidades de análisis ecohidrológico**

Contenido

1	Introducción.	21
2	Descripción de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas (RBSM).	22
a.	Geología y Suelos	24
b.	Uso del suelo.	26
c.	Hidrología	32
d.	Clima, de acuerdo a las regiones hidrológicas de la RBSM.....	32
e.	Extrapolación de variables climáticas.	42
3	Deducción de ecosistemas hidrológicamente homogéneos en la RBSM.	47
a.	Deducción teórica de los ecosistemas hidroclimáticamente homogéneos.	47
4	Selección de subcuencas representativas de la RBSM.	51
a.	Descripción de cuencas ubicadas en sotavento.....	52
b.	Descripción de la subcuenca San Jerónimo ubicada en la zona de transición entre sotavento y barlovento.	56
c.	Descripción de la subcuenca Pueblo Viejo ubicada en barlovento.	60
5	Bibliografía	68
6	Anexos	73
6.1	Anexo 1. Clasificación climática de Thornthwaite.....	73
6.2	Anexo 2. Listado de especies de plantas en la RBSM.	77

Listas de Figuras

Figura 1. Zonificación de la RBSM	23
Figura 2. Geología a nivel de reconocimiento de la RBSM.....	27
Figura 3. Series de suelos a nivel de reconocimiento de la RBSM.....	28
Figura 4. Clasificación taxonómica de suelos de la RBSM	29
Figura 5. Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo	31
Figura 6. Ubicación geográfica, regiones hidrológicas y subcuencas seleccionadas de la RBSM.....	33
Figura 7. Ubicación de estaciones meteorológicas en la RBSM.....	34
Figura 8. Climadiagramas de las estaciones ubicadas en sotavento de la Sierra de las Minas.	38
Figura 9. Climadiagramas de las estaciones ubicadas en Barlovento de la Sierra de las Minas.	40
Figura 10. Isoyetas de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas	44
Figura 11. Isotermas de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas	45
Figura 12. Isopletas de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas	46
Figura 13. Distribución altitudinal y longitudinal de los ecosistemas vegetales sobrepuerto en un transecto entre las cuencas Pueblo Viejo y Pasabien.....	49
Figura 14. Ecosistemas hidrológicamente homogéneos y áreas de conservación de la RBSM.....	53
Figura 15. Microcuencas de la subcuenca Pasabien	54
Figura 16. Dinámica forestal de la subcuenca Pasabien.....	55
Figura 17. Ecosistemas hidrológicamente homogéneos en la subcuenca Teculután.....	57
Figura 18. Microcuencas de la subcuenca Teculután.....	58
Figura 19. Dinámica forestal 2001-2007 para la subcuenca Teculután	59
Figura 20. Ecosistemas hidrológicamente homogéneos sobrepuertos en un mapa de hipsometría de la subcuenca San Jerónimo.....	61
Figura 21. Microcuencas de la subcuenca San Jerónimo.	62
Figura 22. Dinámica forestal 2001-2007 subcuenca San Jerónimo.....	63
Figura 23. Ecosistemas hidrológicamente homogéneos sobrepuertos en un mapa de hipsometría de la subcuenca Pueblo Viejo.....	64
Figura 24. Microcuencas de subcuenca Pueblo Viejo	65
Figura 25. Dinámica forestal subcuenca Pueblo Viejo	66

Listas de Cuadros

Cuadro 1. Resumen de la información de taxonomía de suelos de la RBSM y su ubicación en algunas cuencas selecciónadas.....	30
Cuadro 2. Resumen de la información climática de la región de la RBSM.....	35
Cuadro 3. Resumen de datos para la clasificación Thornthwaite de las estaciones climáticas de Sotavento	39
Cuadro 4. Resumen de datos para la clasificación Thornthwaite de las estaciones climáticas de Barlovento	41
Cuadro 5. Gradiéntes de variables climáticas entre las diferentes estaciones.	42
Cuadro 6. Listado de especies reportadas como endémicas para la Sierra de las Minas y Guatemala o solo conocidas en la RBSM. Fuente: Elaboración propia, basado en estudios científicos de inventarios botánicos	77

1.Introducción.

La Sierra de las Minas es una cadena montañosa ubicada en el nororiente de Guatemala (Figura 1) que por su importancia biológica y social ha sido declarada como un área protegida desde octubre de 1990. Pertenece al Sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas (SIGAP) con una categoría y denominación de Reserva de Biosfera Sierra de las Minas (RBSM) (Fundación Defensores de la Naturaleza. 2010.)

La RBSM se extiende en entre los valles del río Polochic y el río Motagua. Cuenta con una superficie de 242,642 ha y forma parte de cinco departamentos de Guatemala: Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Progreso, Zacapa e Izabal. En un recorrido de este a oeste, se extiende aproximadamente en 130 kilómetros de longitud y varía entre 10 y 30 kilómetros de ancho, con elevaciones desde cerca del nivel del mar, hasta más de 3,000 msnm (Figuras 1 y 2).

En el norte, la Sierra desciende abruptamente hasta el valle del Polochic. Una cresta ininterrumpida por encima de 2100 msnm se extiende desde cerca del poblado Chilascó hacia el Cerro Raxón (3.015 msnm y punto más alto de la Sierra) continua por 65 km al este hasta la Montaña El Imposible (2610 m). A partir de este sitio se presenta hacia el este una caída gradual hacia el Lago de Izabal y el Río Motagua cerca del nivel del mar (Dix, 1997).

El terreno y pendientes en la vertiente sur de la RBSM es significativamente menos pronunciada. Al oeste, la sierra está limitada por los valles de Salamá y San Jerónimo, de origen ígneo. Hacia el norte, formaciones de rocas paleozoicas, incluyen esquistos y gneises, Al sur hay evidencia de metamorfismo en grado terciario de anfibolitas y mármoles. Además se encuentran cinturones de serpentina a lo largo desde la margen norte-occidental y la parte sur de la cordillera (Brown & De la Roca, 1996). Los suelos son poco profundos por lo general, a menudo lateríticos, 25-50 cm de profundidad y consisten en arcillas aluviales y margas. La mayor proporción de sus suelos (aproximadamente 65% de su cobertura) se constituyen en laderas muy susceptibles a erosión.

La Sierra de las Minas está fuertemente influenciada por los vientos alisios del noreste provenientes del Mar Caribe. Se estima que las precipitaciones varían entre más de 4000 mm en las cimas de las montañas y 2000 mm en las laderas que drenan hacia el norte a cerca de 500 mm en el oeste del valle del Motagua entorno a Zacapa (Vora, 1994).

2. Descripción de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas (RBSM).

La Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas fue creada oficialmente por el Decreto 49-90 (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2003). Para resaltar la importancia de la conservación de la RBSM y sus necesidades de generar instrumentos para la conservación de sus servicios ecosistémicos, con énfasis en los de regulación hidrológica, es importante contextualizar los objetivos de creación del área protegida y el estado de conservación de su patrimonio natural. Los objetivos de conservación y el desarrollo sostenible de la RBSM se resumen a continuación:

1. Conservar sus diversos ecosistemas, su biodiversidad, sus recursos genéticos y sus bosques.
2. Proteger las fuentes de agua y cuencas hidrográficas, por su importancia socioeconómica para las áreas circundantes de la Reserva.
3. Usar en forma sostenible los recursos naturales existentes, para beneficio de las poblaciones locales.
4. Proteger y manejar la RBSM en forma conjunta con la población local.
5. Conocer los ecosistemas y la riqueza biológica y genética de la Reserva, para su aplicación en beneficio del país y la humanidad.

La RBSM está dividida en cuatro zonas conservación: zona núcleo, zona de usos múltiples o sostenible, zona de recuperación y zona de amortiguamiento. Los límites de la Reserva y el de sus zonas de uso están establecidos en el Decreto 49-90 y en posteriores Planes Maestros (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2003).

Zona Núcleo. Los principales objetivos de la zona núcleo son la preservación del ambiente natural, conservación de la diversidad biológica y preservación de las fuentes de agua, así como la investigación científica y el turismo ecológico en las áreas habilitadas para ello. Estas últimas actividades no deben afectar negativamente los ecosistemas del área.

Zonas de Uso Múltiple o Sostenible, de Amortiguamiento y de Recuperación. Estas zonas tienen como objetivos primordiales el amortiguamiento de la zona núcleo, la restauración y el fomento del uso sostenible de los recursos naturales, sin afectar negativa y permanentemente sus diversos ecosistemas.

Zona de Amortiguamiento. Esta zona tiene como objetivo lograr el uso y aprovechamiento sostenible de los recursos para mejorar la calidad de vida de sus habitantes, lograr la participación y educación ambiental de las comunidades en el mantenimiento y la mejora de las condiciones de la reserva y sus recursos.

Zona de Recuperación. Tiene como objetivo lograr la recuperación de la cubierta forestal de las áreas de vocación forestal que se encuentran seriamente dañadas por el mal manejo que tradicionalmente se ha hecho en ellas, para proteger y recuperar suelos, fuentes de agua y para rehabilitar hábitat para la vida silvestre.

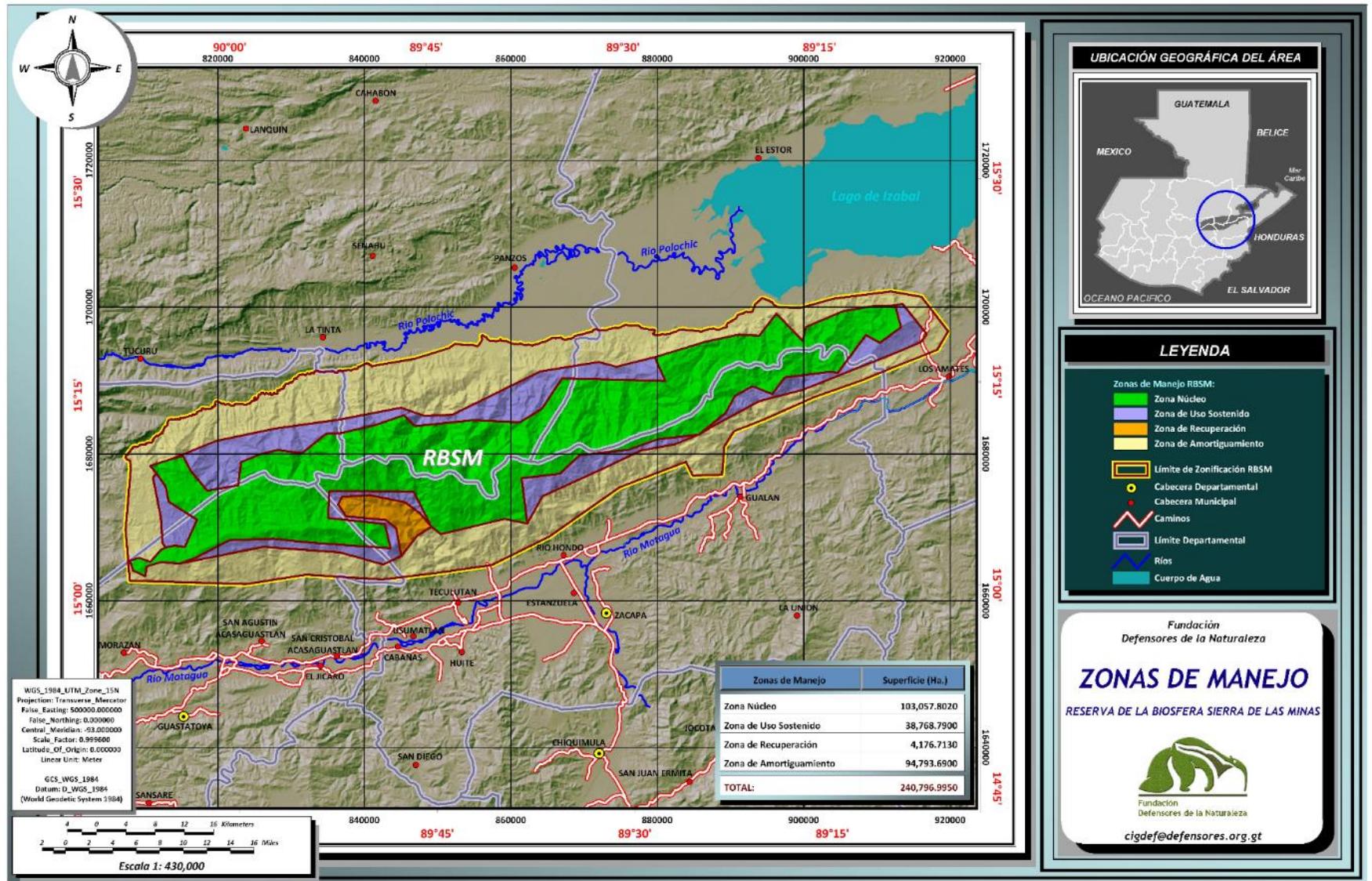


Figura 1. Zonificación de la RBSM.

La RBSM representa, por su extensión y estado de conservación el único ecosistema montañoso “viable” de Mesoamérica. Sin embargo, de acuerdo al Plan Maestro de la RBSM (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2010), se evidencian problemas para el cumplimiento adecuado de sus objetivos de creación y la administración. A continuación se mencionan los principales obstáculos que se enfrentan:

- a) Conflictos por el acceso y uso del agua, especialmente en la parte sur (vertiente Motagua) y oeste (cuenca San Jerónimo). Los conflictos se exacerbaban en la época seca, es decir, marzo, abril y mayo. Se percibe que existen suficientes recursos hídricos, sin embargo, su distribución temporal y espacial no es la adecuada, ni tampoco la tecnología y organización para su distribución.
- b) Incendios forestales durante la época seca, especialmente en la región seca, al sur, de la Sierra de las Minas, es decir en la vertiente del Motagua.
- c) Conflictos generalizados por uso y tenencia de la tierra.
- d) Escases de información científica y económico-financiera para la fundamentación de instrumentos técnicos y financieros para la conservación efectiva, especialmente, alrededor de la zona núcleo.
- e) Se ha evidenciado (WWF, 2009) que la implementación de esquemas de pago o compensación por servicios ambientales a nivel local pueden ser una alternativa viable para mejorar los procesos y generar fuentes de financiamiento y gestión alternativos. En tal sentido existe un proyecto regional para el desarrollo del Fondo del Agua (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2010), el cual es necesario fortalecer.
- f) Alta vulnerabilidad a eventos hidro-climáticos extremos, tanto de sequías prolongadas como eventos de precipitación extrema.

Bajo todo el contexto anterior se hace evidente que la conservación de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica es fundamental para lograr los objetivos de conservación de la RBSM como área protegida de interés nacional y regional. En este sentido se define como estratégico y urgente contar con información relacionada dichos servicios, tanto desde el punto de vista biofísico como socioeconómico, para fundamentar instrumentos que contribuyan significativamente a la conservación y asegurar el abastecimiento hídrico y reducción de riesgo.

a. Geología y Suelos

La Sierra de las Minas se encuentra en una provincia geológica ubicada en el centro de Guatemala que forma un cinturón de oeste hacia el noreste que se caracteriza por la presencia de rocas plutónicas (graníticas) y metamórficas derivadas de altos niveles de metamorfismo regional, producto del rozamiento de la placa Caribe respecto a la placa Norteamericana. La Sierra de las Minas y sistemas montañosos contiguos constituyen la denominada zona de sutura de la falla del Motagua (ZFM) (Dengo, 1968)

La ZFM, identificada por el curso del río del mismo nombre, limita dos bloques tectónicos. Al sur el bloque Chortí y al norte el Bloque Maya. El bloque Maya es subyacente y se distribuye del Sureste de México (al Este del Istmo de Tehuantepec), hasta la parte Norte de Guatemala y Belice. Las unidades más antiguas consisten en rocas metasedimentarias y granitos de edad Grenville, los cuales están cortados por granitos de edad del Siluriano tardío, Mississippiente, Pérmico tardío, Jurásico temprano, y Cretácica con edades de 63 a 78 Ma. Estas son las rocas más antiguas de Centroamérica.

La deformación regional del Paleozoico y Mesozoico, ocurrió durante una orogenia de choque, resultado del levantamiento del bloque Maya y la formación del plegamiento de un cinturón

deformado que compone la cordillera central de Guatemala. Rocas terciarias cercanas a la zona de sutura del Motagua son en su mayoría clástico marinas y volcánicas, indicando un volcanismo activo, actividad tectónica y tasas de erosión muy altas.

Las principales unidades geológicas determinadas para la RBSM (Figura 2), de sur (río Motagua) al norte (río Polochic), son: Aluviones del Cuaternario (Qa) en la parte baja de la vertiente sur de la cadena montañosa, la cual ha sido formada por rocas sedimentarias depositadas por la acción de las aguas de los ríos. En la parte media y alta se define la región de Rocas Metamórficas del Paleozóico (Pzm) y rocas ígneas (I). Estas regiones se caracterizan por la presencia de rocas plutónicas y metamórficas sin dividir, tales como granito, filitas, esquistos cloróticos y granatíferos, esquistos y gneisses de cuarzo – mica – feldespato, mármol y migmatitas. Existen afloramientos de rocas ígneas en el parteaguas entre las vertientes sur y norte de la Sierra de las Minas. La composición geológica del norte de la RBSM está conformada por una amplia región de Pzm y a continuación en la parte media una región denominada Rocas Sedimentarias Carbonífero Pérmico (CPsr) y la parte baja compuesta, nuevamente, por Aluviones del Cuaternario (Qa) (Guatemala, 1960)

A continuación se describen los suelos de la RBSM. De acuerdo a la primera aproximación al mapa de Clasificación Taxonómica de los Suelos de la República de Guatemala, a escala 1:250,000, los suelos con mayor distribución en la RBSM son Chol, Marajuma, Tamahú y Civijá, (Figura 3)

Los Suelos Chol son suelos poco profundos, excesivamente drenados, desarrollados sobre esquisto en un clima seco a húmedo-seco. Ocupan relieves inclinados (50% o más de pendiente) a elevaciones medianas, entre 900 y 1800, en la parte sur de la Sierra de las Minas. Están asociados a los suelos Marajuma, Civija y Acasaguastlán. Se desarrollan sobre esquistos, mientras que los Acasaguastlán se desarrollan sobre serpentina. La cubierta vegetal más común es pino en bosques abiertos con grama delgada.

Los Suelos Marajuma son profundos y bien drenados desarrollados generalmente sobre esquistos, en clima húmedo-seco. Ocupan relieves inclinados (60% de pendiente o más) a altitudes medianas en la parte sur de la Sierra de las Minas, están muy asociados a los suelos Chol, pero éstos son más profundos, con bosques más densos y se han desarrollado en situaciones más húmedas que estos. Se asemejan y forman una cadena con lo Civija, Telemán, Chol, etc. Las variaciones resultan de la variación en la cantidad de precipitación, en la elevación y en la roca madre. La vegetación nativa consiste en bosques deciduos mezclados con pino e incluyen liquidámbar y encino. La profundidad del suelo varía entre 50 cm y un metro.

Los Suelos Tamahú son poco profundos, de bien a excesivamente drenados, desarrollados sobre caliza en un clima húmedo a seco-húmedo. Ocupan relieves inclinados a altitudes medianas en la parte sur y norte de la Sierra de las Minas. La vegetación nativa consiste en bosque deciduo pero hay pino en casi todas las áreas de su distribución. Ocupan pendientes muy inclinadas con relieves “karst” sobre gran parte del área de su distribución. Las pendientes promedio mayores a 100% son comunes. La roca madre es caliza o mármol.

Los suelos Civijá son suelos profundos, bien drenados, desarrollados principalmente sobre esquistos en un clima húmedo. Se encuentran en relieves ondulados a fuertemente inclinados. Los extremos de su ubicación altitudinal es entre 1500 y 2700 msnm. El suelo superficial tiene reacción fuertemente ácida y con una profundidad promedio de 150 cm. En algunos sitios están asociados a los suelos Marajuma y Telemán (desarrollados sobre rocas calizas) y Sholanimá (desarrollados sobre serpentinita o pteridotita) los cuales son similares (Figura 3).

Para conocer más de sus características se hace referencia a la clasificación de suelos elaborado por el Ministerio de Agricultura de Guatemala (Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación, 2003) el cual está basado en el mapa anteriormente descrito. Los órdenes de suelos presentes en la RBSM, principalmente, son: Alfisoles, Entisoles, Ultisoles e Inceptisoles (Figura 4 y Cuadro 1). A continuación se describen los principales órdenes de suelos existentes en el área de estudio, ordenados de sur a norte:

Orden Entisol (ent). Suelos con poca o ninguna evidencia de desarrollo de su perfil y, por consiguiente, de los horizontes genéticos. El poco desarrollo es debido a condiciones extremas, tales como, el relieve (el cual incide en la erosión o, en su defecto, en la deposición superficial de materiales minerales y orgánicos) y, por otro lado, condiciones tal como el exceso de agua. De acuerdo al relieve, estos suelos están presentes en áreas muy accidentadas (cimas de montañas y volcanes) o en partes planas. Este orden de suelos para el estudio se clasifica en tres subórdenes: Orthents (Eo), Psammets Ep y Fluvents (Ef).

Orden Inceptisol (ept). Suelos incipientes o jóvenes, sin evidencia de fuerte desarrollo de sus horizontes, pero son más desarrollados que los entisoles. Son suelos muy abundantes en diferentes condiciones de clima y materiales originarios. Algunos subórdenes presentes que denotan alta cantidad de humedad en la región son suborden Udepts.

Orden Ultisol (ult). Estos son suelos que normalmente presentan una elevada alteración de sus materiales minerales. Presentan un horizonte interior con alto contenido de arcilla (argílico) el cual tiene baja saturación bases (menor de 35%). La mayor parte de los ultisoles son suelos pobres debido al lavado que han sufrido. Por sus niveles de productividad que son muy bajos, demandan tecnologías no convencionales y ser manejados en forma extensiva, pero no con cultivos o actividades productivas exigentes en nutrientes.

Orden Alfisol (alf). Suelos con un horizonte interno que tiene altos contenidos de arcilla con relación a los horizontes superficiales, además presentan alta saturación de bases (mayor de 35%). Los alfisoles son suelos maduros con un grado de desarrollo avanzado, pero que todavía tienen un alto contenido de bases en los horizontes interiores. Generalmente son suelos con buen potencial de fertilidad.

b. Uso del suelo.

De acuerdo al mapa de cobertura vegetal y uso del suelo (Figura 5) se observa que las principales categorías de uso del suelo son, en orden de importancia, bosque latifoliado (45%), arbustos y matorrales (cerca del 20% y predominantemente en la vertiente sur), granos básicos (8%), cultivo permanente de café (cerca del 7%, predominantemente en la vertiente norte), bosque conífero (4%, predominantemente en la vertiente sur) y bosque mixto (3%). La mayor parte de la distribución de cobertura de bosque, tanto latifoliado como conífero y mixto coincide con la ubicación del área núcleo y suman más del 50% de la RBSM.

Asimismo la distribución del área de granos básicos, café, cardamomo y arbustos y matorrales (especialmente al sur) coincide con los sitios de amortiguamiento y uso sostenido. Lo anterior sugiere un ordenamiento y zonificación adecuado.

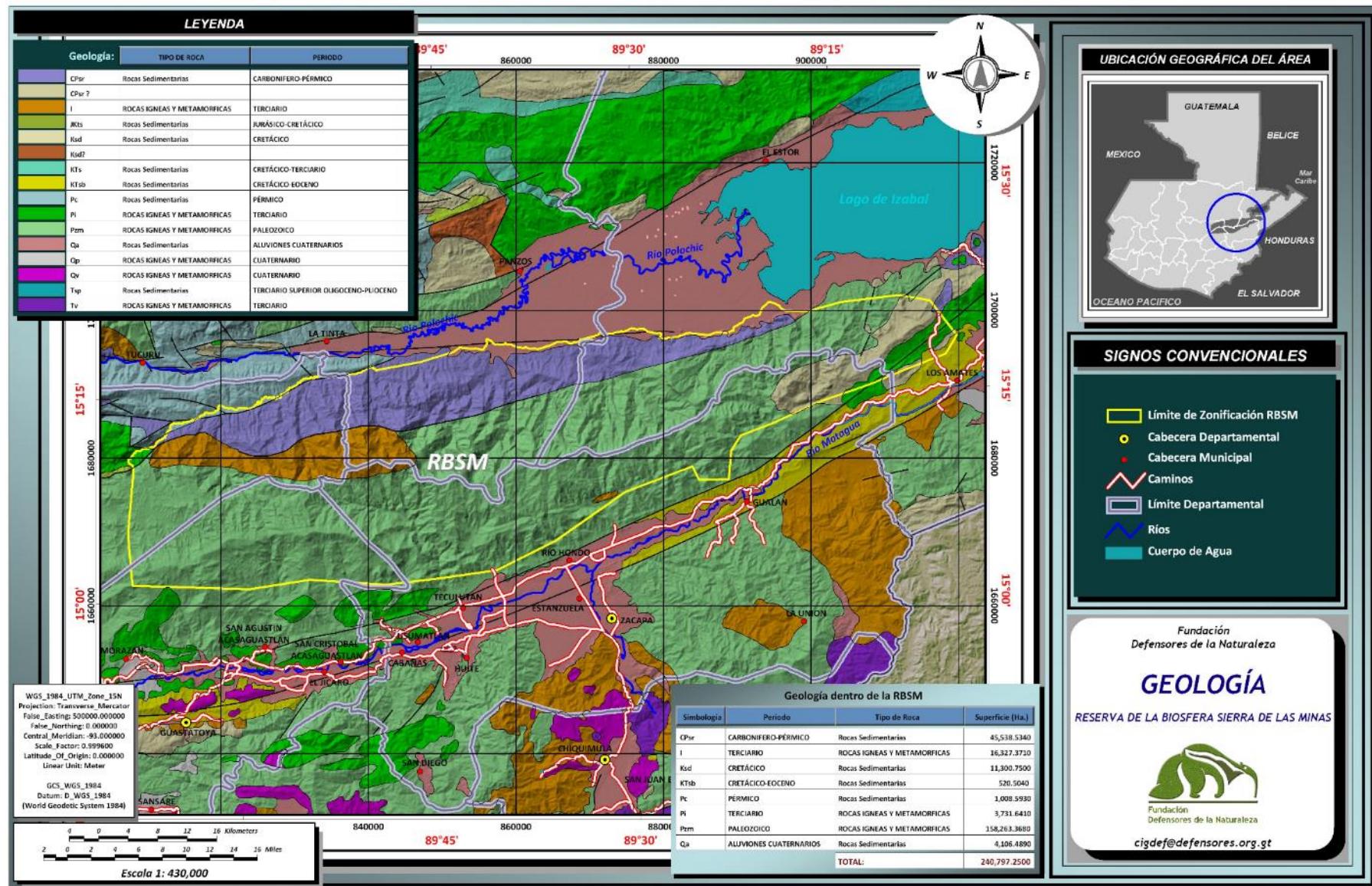


Figura 2. Geología a nivel de reconocimiento de la RBSM.

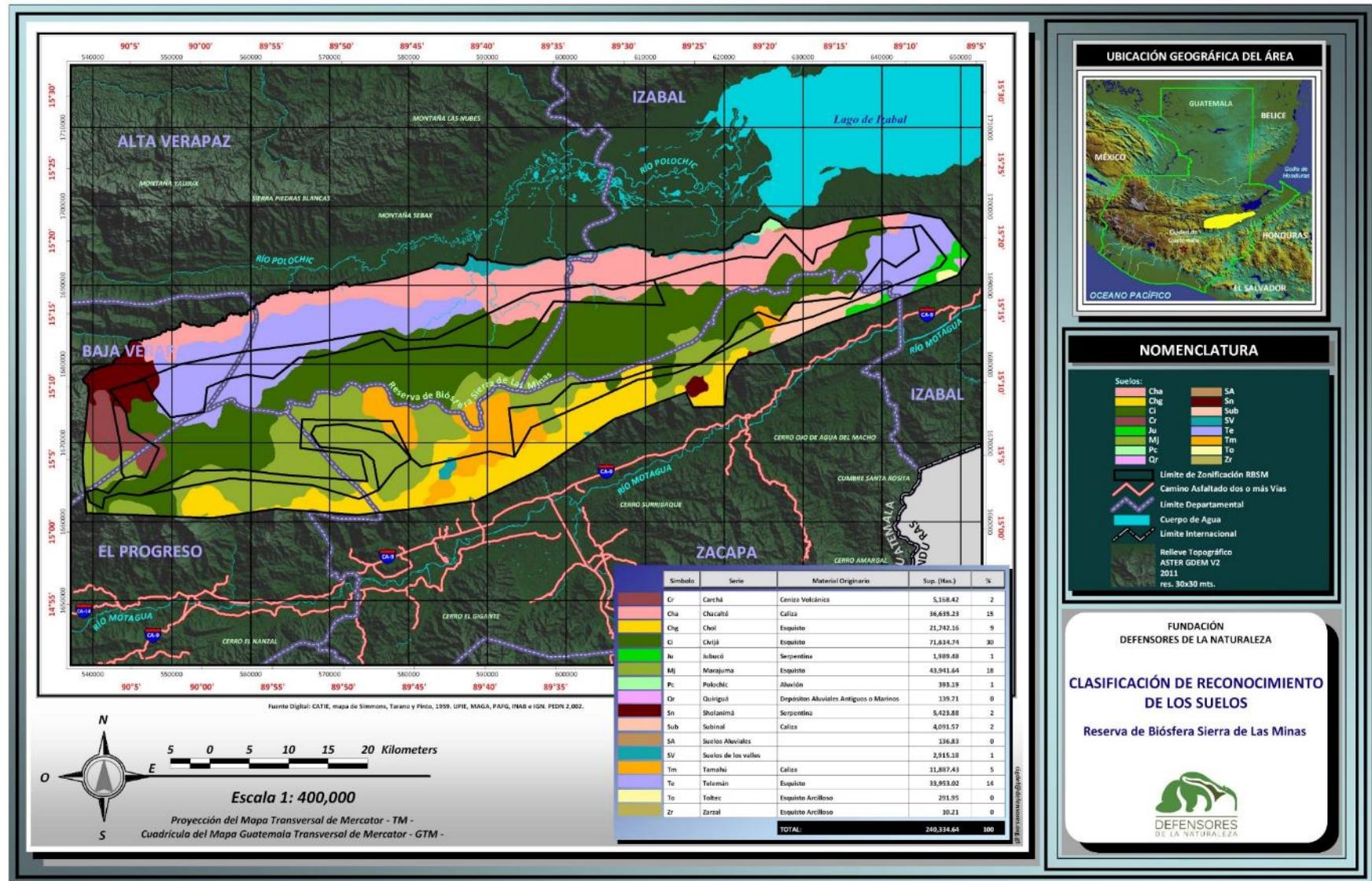


Figura 3. Series de suelos a nivel de reconocimiento de la RBSM.

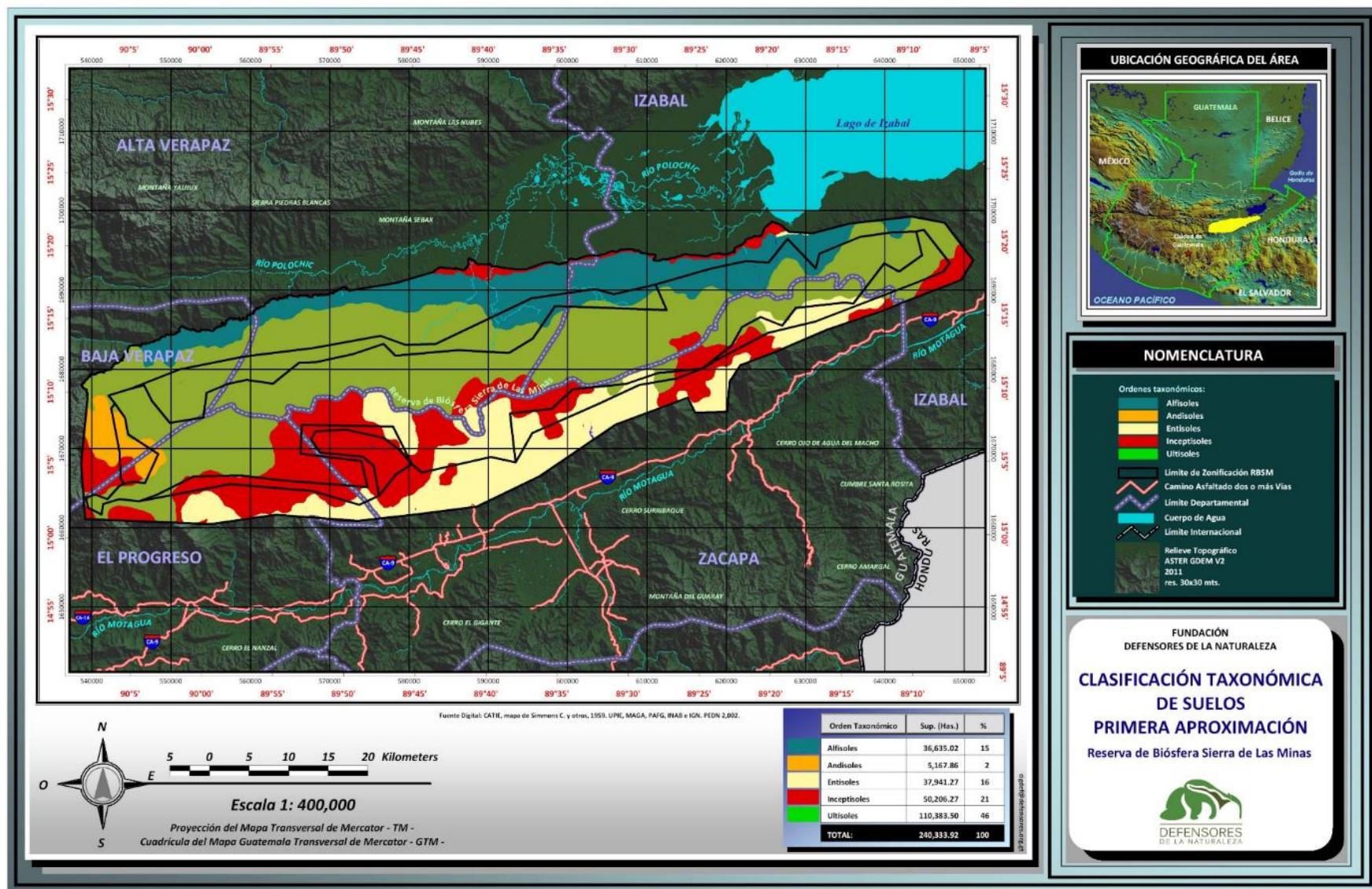


Figura 4. Clasificación taxonómica de suelos de la RBSM.

Cuadro 1. Resumen de la información de taxonomía de suelos de la RBSM y su ubicación en algunas cuencas seleccionadas

Series de suelos	Sub-cuenca*	Orden de suelos	Nomenclatura	Suborden de suelos	Nomenclatura	Material parental	Desarrollo	Profundidad	Pendientes	Humedad /drenaje. Datos anuales
	P, T, SJ, PV	Alfisol	Alf	Udalfs	Ld	Caliza?	Alto (más de 1 perfil)	Poco profundos	Inclinados	Más de 270 días de lluvia
	T			Ustalfs	Ls	Caliza?		Poco profundos	Inclinados	Déficit de humedad entre
Chol	P	Entisol	Ent	Fluvents	Ef	Esquisto	Alto (más de 2)	Poco profundos	< 25 %	Más de 180 días con excesiva
	P, T, SJ, PV			Orthetnts	Eo	Coluviones recientes	Muy bajo	Poco profundos	Poco inclinados	Baja retención de humedad
	P, T, SJ			Psaments	Ep	Aluviones		Variedad	Inclinados	Alto drenaje
	PV			Aquents	Eq	Aluviones	Muy bajo desarrollo	Poco profundos	Muy inclinados	Buen drenaje
Marajuma	P, T, SJ, PV	Inceptisol	Ept	Udepts	Pd	Esquisto	Bajo	Poco profundos	Muy poco inclinados	No secos por más de 90 días
Suelos de los valles	P, T, SJ, PV			Ustepts	Ps	Indefinido	Bajo	Poco profundos	Muy poco inclinados	Secos entre 90 y 180 días
Civijá y Telemán	PV	Ultisoles	Ult	Udult	Ud	Esquisto	Bajo	Variedad	Inclinados	
Carchá	SJ	Andisoles Molisol	And	Udands	Dd	indefinido	Bajo	Profundos	Indefinida	Alta humedad más de 180 días
	Sj		Oll	Ultisol	Ult	Arena volcánica	Alto desarrollo	Profundos	Indefinida	Secos entre 90 y 180 días al año,
	SJ	Vertisol	Ert	Ustert serpentina	Vs	Indefinido	Alto desarrollo	Profundos	Indefinida	Secos entre 90 y 180 días al año,

- P: subcuenca Pasabien; T: subcuenca Teculután; SJ: subcuenca San Jerónimo; PV: subcuenca Pueblo Viejo

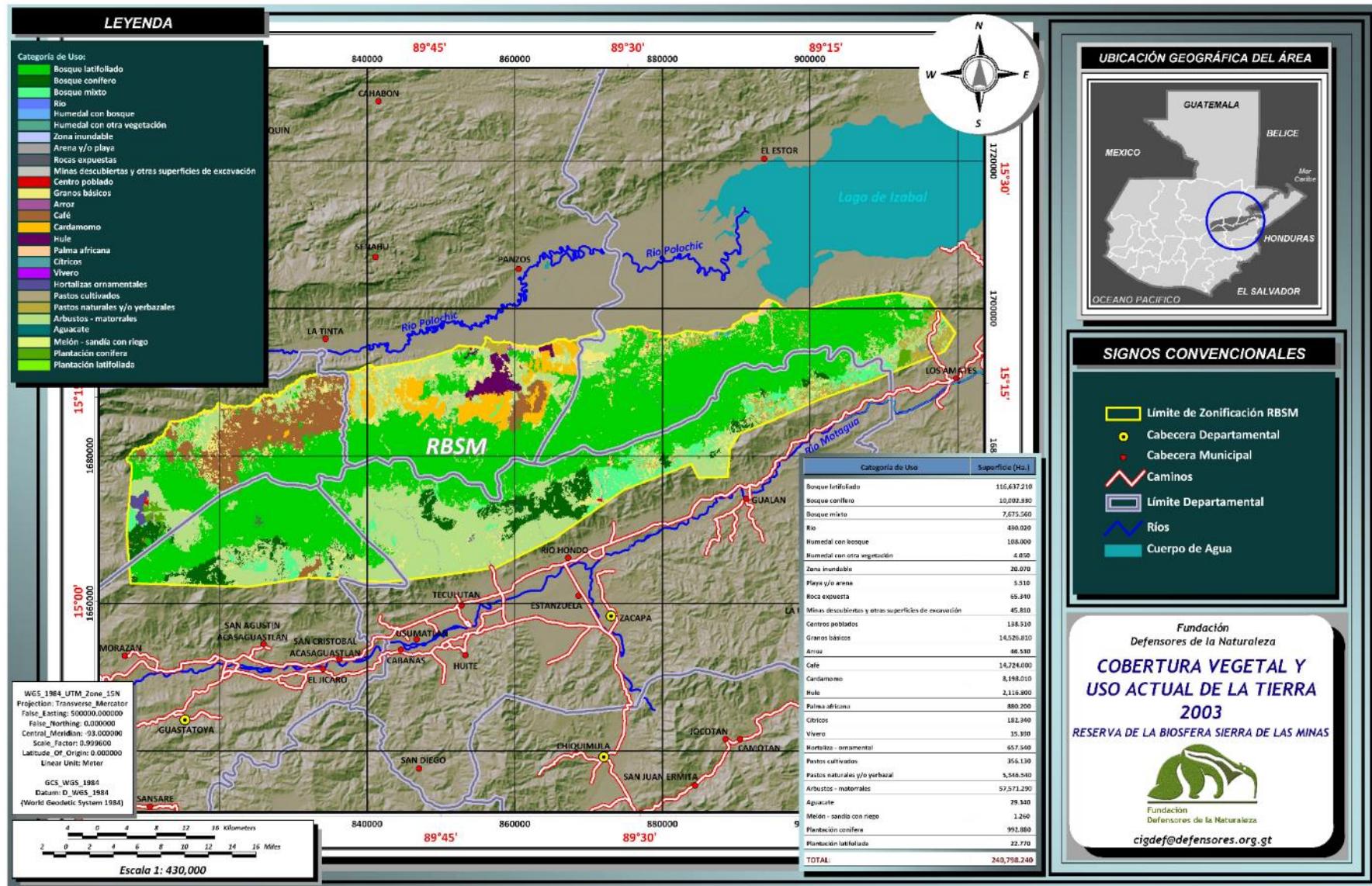


Figura 5. Mapa de cobertura vegetal y uso del suelo.

c. Hidrología

En la Sierra de la Minas y área de influencia se pueden contabilizar nacen 63 ríos importantes, agrupados en 52 subcuencas hidrográficas, las cuales a su vez se distribuyen en tres vertientes, las cuales, de acuerdo a su exposición, drenan hacia los valles circundantes, Valle del Motagua (Ubicado al sur), Valle del Polochic (norte) y Valle de San Jerónimo – Salamá o río Chixoy (oeste). La mayor parte de los ríos se originan en el ecosistema denominado bosque nuboso, por ello este ecosistema es uno de los principales objetos de conservación del área protegida.

Las características hidrológicas de estas cuencas son muy diferenciadas de acuerdo a la vertiente en la que se encuentran: Con exposición hacia el norte se encuentra la región denominada como barlovento, en la que prevalece condiciones húmedas por recibir corrientes de humedad provenientes del noreste, es decir, del océano atlántico (mar caribe). Con exposición hacia el sur se presenta la región de sotavento o de sombra de montaña con la ocurrencia de menores niveles de precipitación en la parte media y baja. Hacia el oeste drenan algunas subcuencas en una región de transición ya que tiene influencia de corrientes del noreste pero también se evidencian algunas características de sotavento, tal como el valle seco en la parte baja de la cuenca San Jerónimo. En tal sentido esta región se considera como una zona de transición entre barlovento y sotavento. En la Figura 6 se muestran las regiones hidrológicas y la ubicación de cuencas representativas que se describirán más adelante.

Para comprender las relaciones hidrológicas es importante conocer el clima que afecta e interacciona con los ecosistemas en cada una de las tres regiones hidrográficas de la cadena montañosa de la RBSM. Este se aborda a continuación.

d. Clima, de acuerdo a las regiones hidrológicas de la RBSM

Las principales variables que se emplean para describir el clima son la precipitación y la temperatura. En la RBSM la cantidad y características de la lluvia en las partes altas varían mucho en distancias muy cortas. La precipitación se estima, dependiendo de la ubicación, entre los 700 y 3,000 mm anuales en promedio. La lluvia y la condensación de agua en la vegetación de los bosques nubosos alimentan a los ríos, también durante los meses de baja precipitación. La depresión oeste-este de la Sierra de las Minas, juega un papel muy importante en el patrón de precipitación del Valle del Motagua. Las cordilleras altas crean condiciones de sombra de lluvia, lo que repercute que en el valle medio del Motagua se reporte una precipitación anual de menos de 500 mm (Campbell, 1982), siendo entonces el valle más árido y seco de Centro América. La temperatura media varía entre 13 – 32 ° C, en el gradiente altitudinal dentro de la Sierra de las Minas. La humedad relativa puede variar entre 80 a 95 % en diferentes épocas del año.

Los registros climáticos recopilados fueron analizados para establecer su consistencia. Es importante mencionar que los registros de las variables del clima son limitados. Los datos históricos con mayor tiempo de recopilación se encuentran en la parte sur (sotavento) de la zona en estudio, aquí se pueden mencionar las estaciones de Morazán, San Lorenzo, Pasabien y Los Albores (Cuadro 2, indicadas en color marrón). Otras estaciones fueron encontradas con registros recientes, no oficiales y de corta duración (2 años), sin embargo, se analizan cuando se consideró necesario, solamente como una referencia complementaria, este es el caso de la estación de Chanrayo ubicada en el río Hato, la estación las Delicias ubicada en la cuenca del mismo río. Las estaciones se encuentran a una altura de 1000 y 1600 msnm, respectivamente.

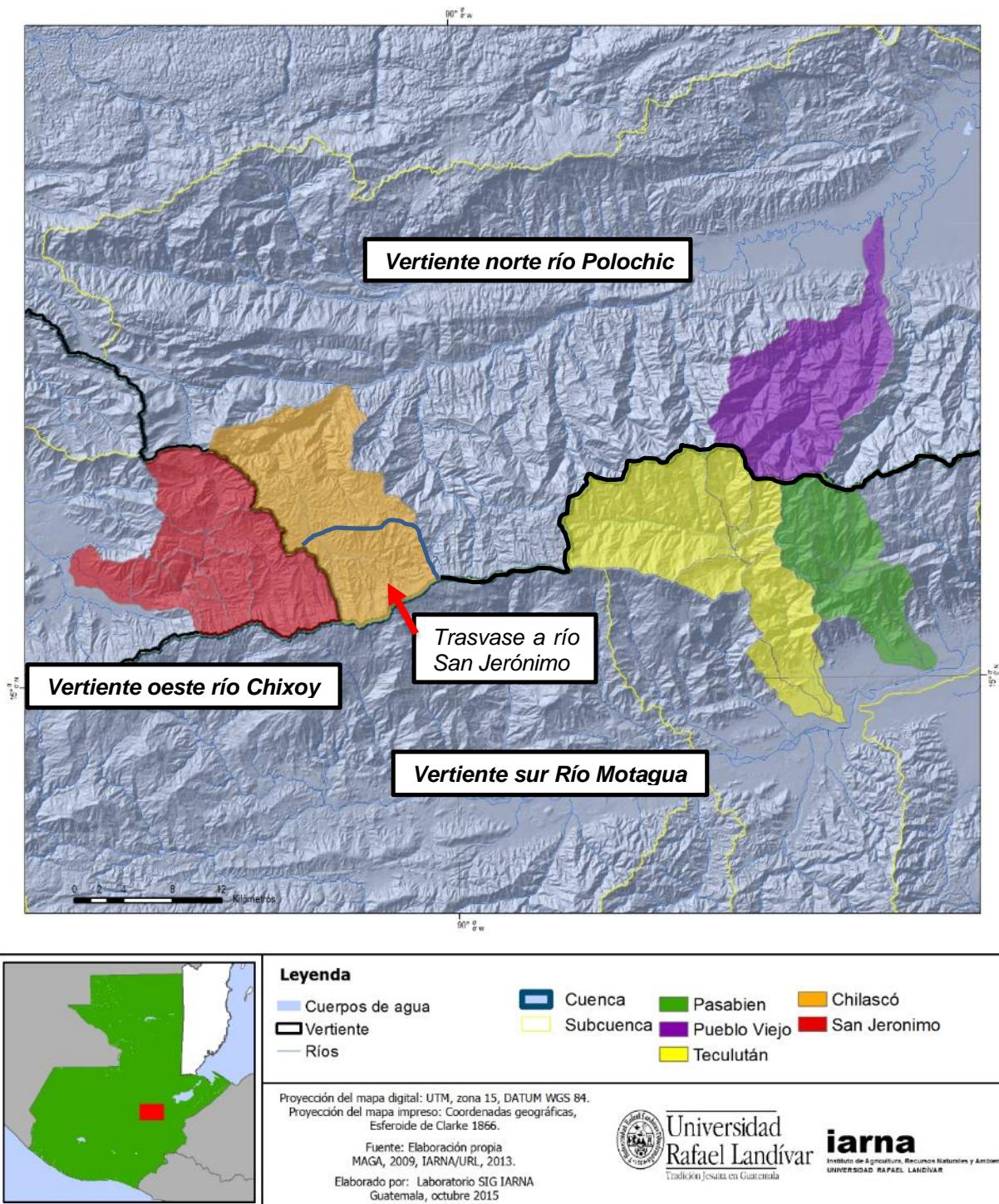


Figura 6. Ubicación geográfica, regiones hidrológicas y subcuenca seleccionadas de la RBSM.

El monitoreo climático en la zona norte (barlovento) del área de estudio es muy escaso y de corta duración (dos años), sin embargo, fueron considerados como adecuados para esta análisis general del área de estudio. Se cuenta con las estaciones, en el norte y noreste de la RBSM, Pancajoc, La Pinada, Sepur y San Marcos; las cuales permiten establecer gradientes de comportamiento de las variables climáticas, especialmente de la parte baja (menores a 500 msnm) y parte media (entre 500 y 1000 msnm) de la vertiente norte de la RBSM (Cuadro 2, color azul).

Por otro lado en la zona de transición (cuenca San Jerónimo) se cuenta con una estación automatizada en Chilascó con datos de más de diez años, sin embargo únicamente se cuenta información de la precipitación. Toda la información recopilada se ordenó y se analizó, determinando los valores medios mensuales para cada una de las estaciones. Asimismo se estimó, cuando era posible, la evapotranspiración potencial por el método de Hargreaves y se estableció un balance inicial del comportamiento de las variables de precipitación y evapotranspiración. La localización de las estaciones climáticas se puede observar en la siguiente figura (Figura 7), y el resumen de la información de variables climática se presenta en el Cuadro 2.

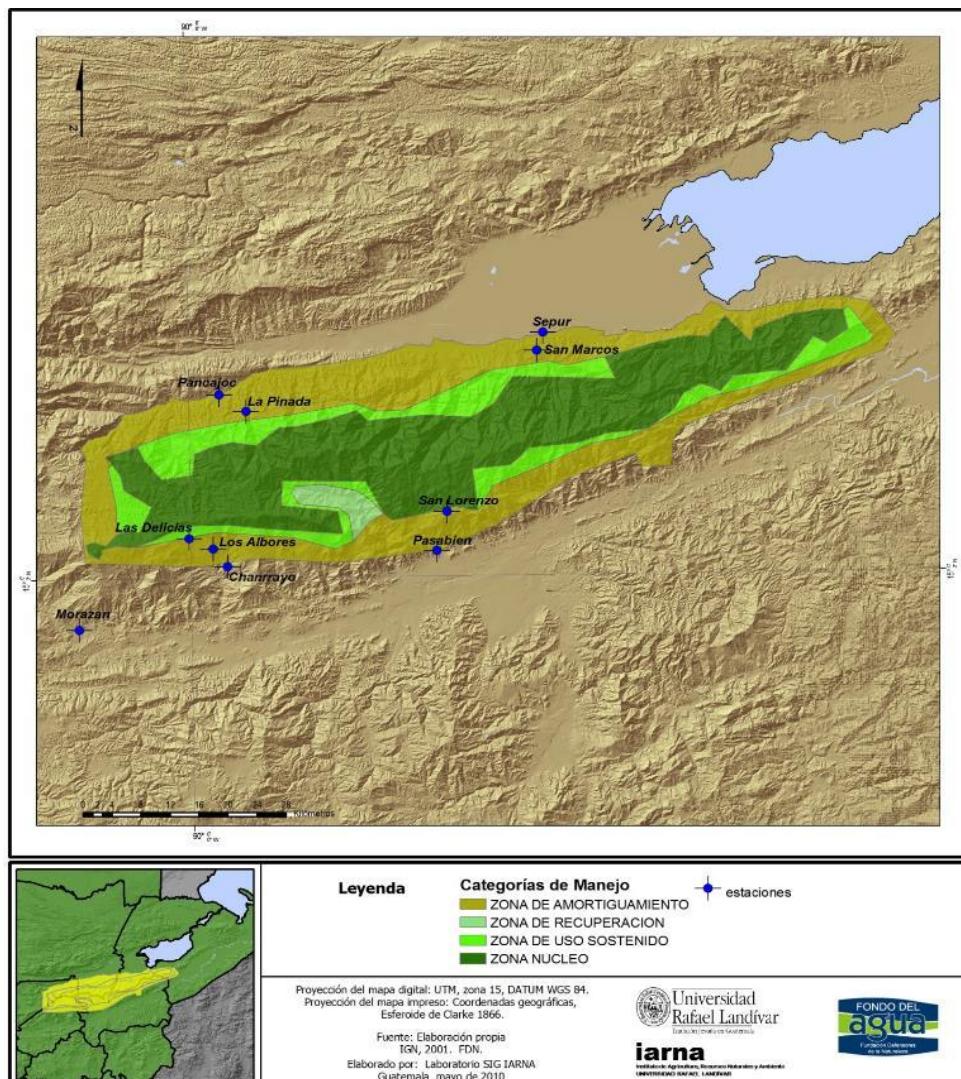


Figura 7. Ubicación de estaciones meteorológicas en la RBSM

Cuadro 2. Resumen de la información climática de la región de la RBSM

ESTACION	Variable	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
REGION SOTAVENTO														
Morazán 370 msnm	PPT	4.4	3.4	12.0	36.5	87.6	144.9	91.6	103.0	167.1	99.8	38.4	10.5	799.1
	TC	26.0	27.4	29.1	30.9	30.3	28.6	28.6	28.7	27.7	27.4	26.4	25.9	28.1
	ETP	113.1	118.4	152.9	166.5	176.3	164.9	169.7	165.9	147.7	138.2	114.7	108.6	1736.9
	PPT-ETP	-108.7	-115.0	-140.9	-130.0	-88.7	-20.1	-78.1	-62.9	19.4	-38.4	-76.3	-98.2	-937.8
Pasabién 260msnm	PPT	1.9	0.7	6.8	31.0	85.6	199.2	83.2	138.9	163.0	97.3	24.0	6.6	838.3
	TC	28.3	26.2	28.2	31.8	31.9	31.1	30.0	30.6	30.5	29.5	28.3	27.4	29.5
	ETP	107.0	120.9	152.6	190.7	189.2	170.9	150.3	151.7	151.2	133.7	112.4	97.2	1727.8
	PPT-ETP	-105.1	-120.2	-145.8	-159.7	-103.6	28.3	-67.1	-12.8	11.8	-36.4	-88.4	-90.6	-889.6
Los Albores 1600 msnm	PPT	22.3	16.0	23.0	33.5	127.5	268.0	223.0	227.0	333.0	205.0	105.0	35.6	1618.9
	TC	16.9	17.5	19.0	20.1	20.2	20.3	19.2	19.3	19.3	18.0	17.0	16.2	18.6
	ETP	45.0	48.5	61.5	68.9	69.3	70.0	57.9	63.1	63.8	51.5	50.2	42.3	692.0
	PPT-ETP	-22.7	-32.5	-38.5	-35.4	58.3	198.0	165.1	163.9	269.2	153.5	54.8	-6.7	926.9
San Lorenzo 1750 msnm	PPT	7.0	18.0	24.0	43.0	179.0	288.0	219.0	189.0	351.0	198.0	67.0	16.0	1599.0
	TC	12.9	13.3	14.2	15.8	16.3	15.9	14.2	14.7	13.8	14.1	13.2	12.6	14.2
	ETP	42.3	44.1	49.8	56.4	58.4	56.7	53.8	56.5	53.2	53.2	49.1	45.5	619.0
	PPT-ETP	-35.3	-26.1	-25.8	-13.4	120.6	231.3	165.2	132.5	297.8	144.8	18.0	-29.5	980.0
Las Delicias Hato 1300 msnm	PPT	68.0	21.0	4.0	15.0	44.0	287.0	518.0	301.0	354.0	320.0	18.0	25.0	1975.0
	TC	17.3	16.5	18.1	20.9	19.2	18.4	18.8	19.4	20.1	17.4	16.3	16.5	18.2
	ETP	90.7	89.9	117.1	132.3	135.6	128.6	133.8	132.8	123.1	107.6	88.5	85.3	1365.0
	PPT-ETP	-22.7	-68.9	-113.1	-117.3	-91.6	158.4	384.2	168.3	231.0	212.4	-70.5	-60.3	610.0
REGION DE TRANSICIÓN ENTRE BARLOVENTO Y SOTAVENTO														
Chilascó 1831 msnm	PPT	80.0	30.0	20.0	83.0	201.0	153.0	149.0	160.0	252.0	70.0	112.0	90.0	1400.0
REGIÓN BARLOVENTO														
Pancajoc 300 msnm	PPT	40.0	54.0	17.0	92.0	458.0	766.0	942.0	316.0	524.0	318.0	5.0	81.0	3613.0
	TC	21.3	22.8	21.9	21.4	20.8	19.8	21.0	21.1	21.6	21.0	22.1	21.4	21.4
	ETP	101.0	106.4	129.5	134.0	141.5	133.6	141.9	138.8	127.9	118.6	103.5	97.4	1474.1
	PPT-ETP	-61.0	-52.4	-112.5	-42.0	316.5	632.4	800.1	177.2	396.1	199.4	-98.5	-16.4	2138.9
La Pinada Pancajoc 800 msnm	PPT	45.0	81.0	20.0	77.0	20.0	1096.0	1076.0	384.0	702.0	407.0	12.0	111.0	4031.0
	TC	22.4	22.7	25.3	27.2	22.8	21.9	21.7	22.5	24.5	21.6	22.4	22.3	23.1
	ETP	103.8	106.1	140.5	153.8	148.8	141.0	144.4	143.8	137.3	120.5	104.3	99.7	1544.0
	PPT-ETP	-58.8	-25.1	-120.5	-76.8	-128.8	955.0	931.6	240.2	564.7	286.5	-92.3	11.3	2487.0
San Marcos Zarco 350 msnm	PPT	132.0	164.0	44.0	221.0	203.0	495.0	1018.0	322.0	539.0	512.0	13.0	227.0	3890.0
	TC	25.1	23.3	24.8	26.7	27.0	26.2	26.3	27.4	28.0	25.2	24.2	24.2	25.7
	ETP	110.8	107.7	138.9	152.1	164.2	156.3	161.3	161.3	148.7	131.5	109.0	104.4	1646.2
	PPT-ETP	21.2	56.3	-94.9	68.9	38.8	338.7	856.7	160.7	390.3	380.5	-96.0	122.6	2243.8
Sepur Zarco 100 msnm	PPT	115.0	0.0	41.0	137.0	147.0	328.0	948.0	210.0	560.0	458.0	16.0	142.0	3102.0
	TC	24.3	24.0	26.7	28.6	29.1	27.9	27.5	28.7	29.3	26.5	24.8	24.5	26.8
	ETP	108.8	109.5	145.1	158.6	171.9	162.4	165.7	166.0	152.9	135.5	110.5	105.2	1691.9
	PPT-ETP	6.3	-109.5	-104.1	-21.6	-24.9	165.6	782.3	44.1	407.1	322.6	-94.5	36.8	1410.1

PPT Precipitación mm/mes

TC Temperatura en grados Celsius

ETP Evapotranspiración mm/mes

PPT-ETP Balance mm/mes

Para cada una de las estaciones se estableció un climadiagrama que permite ilustrar el comportamiento promedio anual de las variables climáticas. Para tal fin se utilizaron los datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración. Se elaboró una gráfica que muestra las épocas de déficit y exceso de humedad. Posteriormente, utilizando la metodología de Thornthwaite, se

clasificó el clima que cada estación representa (para mayor detalle de la metodología, ver Anexos de este capítulo).

La importancia del sistema de Thornthwaite está dado por el cálculo de índices que expresan, para el conjunto del año medio, el grado de sequía, el grado de humedad de una región, grado de estacionalidad, así como la eficiencia térmica. Se parte de la definición de los déficits anuales y los excedentes anuales de agua comparando, por un lado, la evapotranspiración “real” (e.r. o ETR) con la evapotranspiración potencial (n o ETP), y por el otro las precipitaciones con la evapotranspiración “real”.

Esta última se calcula teniendo en cuenta las cantidades de agua que el suelo puede brindarle a la vegetación cuando sus necesidades de agua (mensuales) se hacen superiores a los aportes por precipitación.

A continuación se definen las variables y los índices básicos:

n: (necesidad hídrica): a las necesidades de agua anuales (de la vegetación), expresadas por el valor de la evapotranspiración potencial (ETP),

e.r.: a la evapotranspiración real (ETR), calculada según el método de balance hídrico de Thornthwaite.

d: al total anual de los déficits de agua mensuales de agua

s: al total anual de los excedentes mensuales

p: al total anual de las precipitaciones,

se tienen para todo el año medio, las siguientes relaciones simples:

$$d = n - e.r.$$

$$s = p - e.r.$$

A partir del conocimiento de los anteriores se estiman los índices de humedad y de aridez:

$$\text{Índice de humedad } I_h = 100 * s / n$$

$$\text{Índice de aridez } I_a = 100 * d / n$$

Derivados de los índices anteriores se desarrolla la clasificación climática, de acuerdo a la metodología Thornthwaite, caracterizando el clima de un lugar por la sucesión de cuatro letras indexadas que indican en su orden: el grupo climático según el índice global de humedad, el tipo de eficacia térmica media anual según el valor anual de la ETP tomada directamente como elemento climático, el tipo de variación estacional de la humedad efectiva, utilizando las razones de aridez o de humedad según el caso, y el grupo de la concentración estival de la eficacia térmica. Para mayor información consultar Anexo1 o bibliografía básica de climatología.

Análisis climático de las estaciones ubicadas en sotavento.

A continuación se describen las estaciones ubicadas en sotavento. Las estaciones climáticas de sotavento muestran un comportamiento anual, en términos de distribución temporal, muy similar. Cerca de seis meses de lluvia, siendo este período del mes de mayo a octubre. Sin embargo la lluvia presenta un promedio anual de cercano a 700 mm en la parte baja (estaciones climáticas ubicadas debajo de 300 msnm, estaciones Morazán y Pasabien) y cercanos a 2000 mm en las estaciones ubicadas entre 1300 y 1800 msnm (Albores, San Lorenzo y Las delicias). La lluvia se muestra con una distribución bimodal, es decir con dos puntos más altos en los meses de junio y septiembre, siendo estos entre 150 y 200 mm para las estaciones de baja altitud y cercanos a 300 mm en los de altitud superior. Se observa la ocurrencia de un periodo intermedio en la época lluviosa con menor precipitación correspondiente a la denominada “canícula” en todas las estaciones (Figura 8).

La evapotranspiración potencial muestra una demanda atmosférica de entre 100 y 200 mm mensuales en las estaciones ubicadas en bajas altitudes y de 50 mm en las estaciones con mayor altitud, esta última no evidencia cambios significativos durante el año. El balance hídrico presenta excesos únicamente en los meses de junio y septiembre en las estaciones bajas y de mayo hasta noviembre en las partes más altas (Figura 8).

El resumen los factores considerados en la clasificación de Thornthwaite se muestran en el Cuadro 4. En tal sentido se muestra el régimen de humedad contrastante, determinado por la relación entre el exceso y el déficit anual, con condiciones de un clima semiárido o seco, es decir deficitario de humedad, para la parte baja (250 msnm) y perhúmedo, excedentario de humedad, para las estaciones superiores a 1,300 msnm.

Al establecer la estacionalidad o variación estacional de la humedad, de manera concomitante de acuerdo al régimen de humedad ya establecido, se muestra una estacionalidad moderada para las regiones de baja altitud (poco o nulo exceso de humedad), alta estacionalidad para la estación climática de las delicias ubicada a 1200 msnm y moderado déficit hídrico para las estaciones ubicadas arriba de 1500 msnm (Cuadro 3)

La eficiencia térmica representada por la evapotranspiración potencial anual y se evidenció que las estaciones inferiores a 1200 msnm son megatermales (alta eficiencia) y las estaciones superiores a esta cota son mesotermiales (eficiencia moderada) (Cuadro 3).

La variación estival de la temperatura o evapotranspiración indica cómo se concentra la evapotranspiración en los tres meses más secos, para el caso de todas las estaciones analizadas este es menor a 48%, por lo que esta variación puede considerarse baja (Cuadro 3)

Análisis climático de las estaciones ubicadas en barlovento.

Los climadiagramas (Figura 9) muestran para esta región una alta precipitación anual (entre 2000 y 4000 mm), un comportamiento polimodal de la precipitación con sus puntos más altos, principalmente, en los meses de junio, julio y septiembre; y, la presencia de un periodo intermedio en la época lluviosa con menor precipitación en el mes de agosto correspondiente a la "Canícula". Los excesos se marcan durante toda la oca lluviosa, teniendo excedentes de aproximadamente 950 mm en los meses de junio y julio. La época lluviosa inicia en abril, sin embargo hay precipitaciones durante todo el año, pero se concentran en los meses de junio a octubre, los balances mensuales de humedad son en su mayoría negativos, pero los excesos son mucho mayores que el déficit que se presentan. La evapotranspiración potencial muestra una demanda atmosférica de entre 100 y 200 mm mensuales para todas las estaciones. Los balances hídricos presentan excedentes durante cinco o 6 meses, desde mayo hasta octubre (Figura 9).

Las cuatro estaciones climáticas muestran, de acuerdo al método de Thornthwaite, una clasificación similar. En términos del índice global de humedad son perhúmeda, con estacionalidad moderada. La eficiencia térmica se clasifica como megatermal y presenta baja concentración estival de la concentración de la evapotranspiración, siendo estos menores al 48% (Cuadro 4).

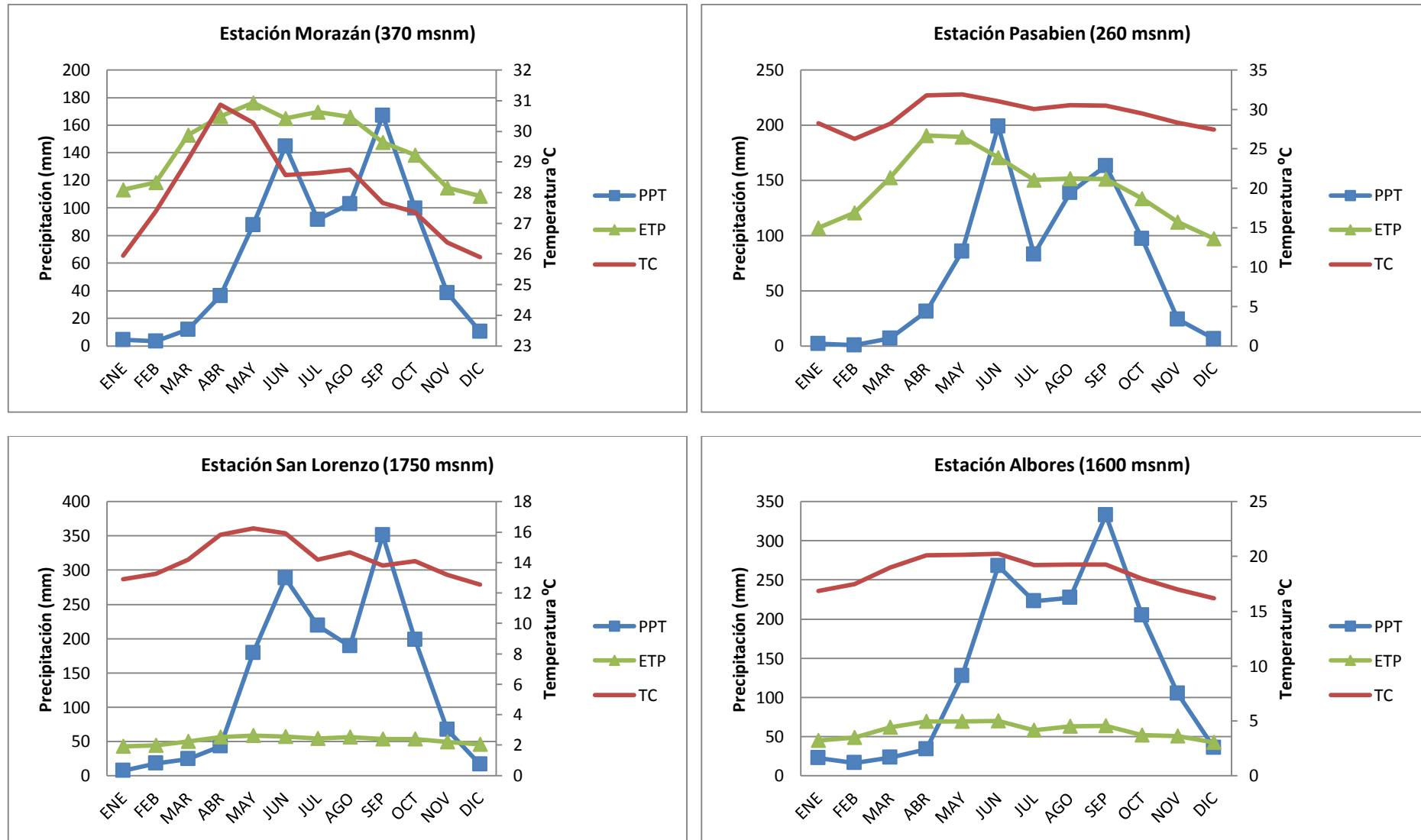


Figura 8. Climadiagramas de las estaciones ubicadas en sotavento de la Sierra de las Minas

Cuadro 3. Resumen de datos para la clasificación Thornthwaite de las estaciones climáticas de Sotavento

Sotavento									
Pasabien	250 msnm	Morazán	250 msnm	Las Delicias	1200 msnm	Albores	1600 msnm	San Lorenzo	1700 msnm
Régimen de Humedad		Régimen de Humedad		Régimen de Humedad		Régimen de Humedad		Régimen de Humedad	
Exceso	40	Exceso	0	Exceso	1154	Exceso	1063	Exceso	1110
Déficit	930	Déficit	938	Déficit	-544	Déficit	-136	Déficit	-130
ETP	1728	ETP	1737	ETP	1365	ETP	692	ETP	619
Im	-30	Im	-32	Im	108	Im	165	Im	192
Variación estacional de la Humedad		Variación estacional de la Humedad		Variación estacional de la Humedad		Variación estacional de la Humedad		Variación estacional de la Humedad	
Ia	54	Ia	54	Ia	-40	Ia	-20	Ia	-21
lh	2	lh	0	lh	85	lh	154	lh	179
Índice de Eficiencia térmica		Índice de Eficiencia térmica		Índice de Eficiencia térmica		Índice de Eficiencia térmica		Índice de Eficiencia térmica	
Etp	1728	Etp	1737	Etp	1365	Etp	692	Etp	619
[] de eficiencia térmica		[] de eficiencia térmica		[] de eficiencia térmica		[] de eficiencia térmica		[] de eficiencia térmica	
[] Et	27	[] Et	29	[] Et	29	[] Et	28	[] Et	27
D	Semiárido o seco	D	Semiárido o seco	A	Súper húmedo	A	Súper húmedo	A	Súper húmedo
D	Nulo o pequeño exceso de agua	d	Nulo o pequeño exceso de agua	s2	Gran deficiencia en verano	s	Moderada deficiencia en verano	s	Moderada deficiencia en verano
A'	Megatérmica o cálida	A'	Megatérmica o cálida	A'	Megatérmica o cálida	B'1	Meso térmica Semi fría	B'1	Mesotermica Semi fría
a'	Menos del 48% en verano	a'	Menos del 48% en verano	a'	Menos del 48 % en verano	a'	Menos del 48 % en verano	a'	Menos del 48 % en verano

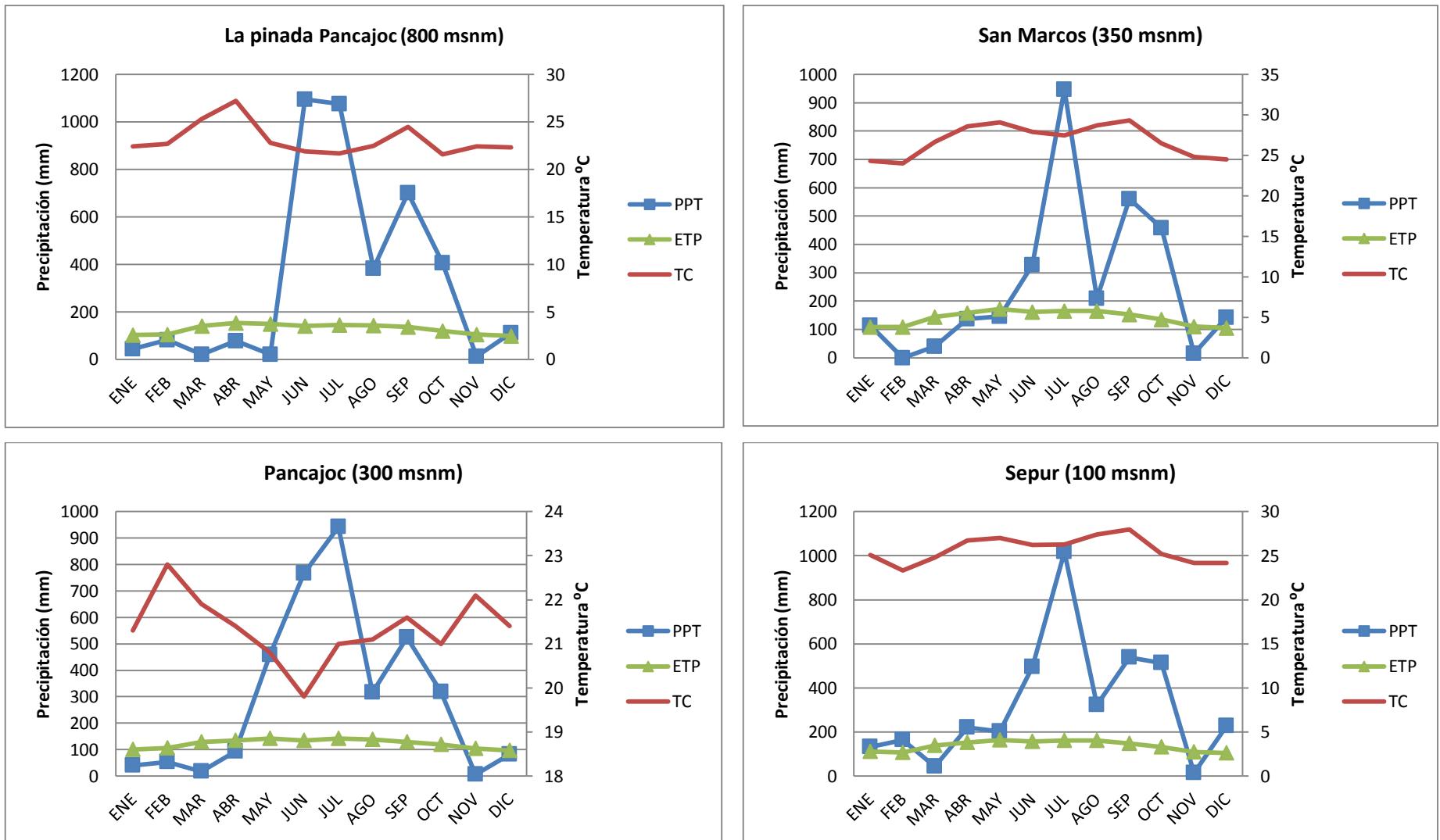


Figura 9. Climadiagramas de las estaciones ubicadas en Barlovento de la Sierra de las Minas.

Cuadro 4. Resumen de datos para la clasificación Thornthwaite de las estaciones climáticas de Barlovento

Barlovento							
La Pinada Pancajoc	900 msnm	Pancajoc	300 msnm	Sepur	100 msnm	San Marcos	100 msnm
Régimen de Humedad		Régimen de Humedad		Régimen de Humedad		Régimen de Humedad	
Exceso	2989	Exceso	2522	Exceso	1765	Exceso	2435
Déficit	-502	Déficit	-383	Déficit	-355	Déficit	-191
ETP	1544	ETP	1474	ETP	1692	ETP	1646
Im	213	Im	187	Im	117	Im	155
Variación estacional de la Humedad		Variación estacional de la Humedad		Variación estacional de la Humedad		Variación estacional de la Humedad	
Ia	-33	Ia	-26	Ia	-21	Ia	-12
Ih	194	Ih	171	Ih	104	Ih	148
Índice de Eficiencia térmica		Índice de Eficiencia térmica		Índice de Eficiencia térmica		Índice de Eficiencia térmica	
Etp	1544	Etp	1474	Etp	1692	Etp	1646
[] de eficiencia térmica		[] de eficiencia térmica		[] de eficiencia térmica		[] de eficiencia térmica	
[] Et	28	[] Et	28	[] Et	29	[] Et	29
A	Súper húmedo						
s	Moderada deficiencia en verano	s	Moderada deficiencia en verano	r	Moderada deficiencia en verano	r	Nula o pequeña deficiencia de agua
A'	Megatérmica o cálida						
a'	Menos del 48	a'	Menos del 48 de ETP en verano	a'	Menos del 48 de ETP en verano	a'	Menos del 48 de ETP en verano

e. Extrapolación de variables climáticas.

El análisis presentado en los acápite anteriores corresponde al clima observado en cada una de las estaciones climáticas encontradas en el área, estas representan puntos específicos. A continuación se analizará la relación de estos puntos para inferir el comportamiento del clima a escala regional, especialmente para contar con una aproximación inicial de sitios sin datos históricos.

En el caso de la Sierra de las Minas existen tres épocas hidrológicas, claramente definidas. La estación lluviosa, de mayo a octubre-noviembre; la época seca de noviembre a abril, la cual es muy marcada especialmente en la parte sur y seca de la cadena montañosa. En la parte norte y alta se presentan algunas lluvias en una época denominada como transicional de noviembre a febrero. Basado en lo anterior se pueden inferir dos tipos de precipitación dominantes, de acuerdo a las corrientes de humedad que afectan esta región geográfica. Las precipitaciones convectivas dominan durante la estación lluviosa de mayo a octubre, principalmente vinculadas a la afectación de los vientos alisios vinculados a la migración estacional de la zona de convergencia intertropical. Las lluvias orográficas dominantes por corrientes de vientos norte y noreste provenientes de frentes de humedad movilizadas por los vientos polares del norte.

La temperatura presenta un comportamiento teórico que es inversamente proporcional a la altitud y como la evapotranspiración está relacionada a la temperatura, su comportamiento será similar.

Los dos tipos de precipitación dominantes en la Sierra de las Minas presentan diferenciaciones que claramente obedecen a gradientes altitudinales, de acuerdo a la presión atmosférica, demandas de evapotranspiración de la atmósfera y la vertiente.

Partiendo del análisis anterior es pertinente utilizar el criterio de la proximidad y la diferencia de altura entre las estaciones. En tal sentido se procedió a encontrar gradientes de comportamiento de las diferentes variables climáticas de tal forma de encontrar la distribución espacial de la variable en función de la altura. A continuación se muestran los gradientes encontrados para las diferentes variables analizadas utilizando isolíneas derivadas de los gradientes altitudinales (Cuadro 5).

Cuadro 5. Gradientes de variables climáticas entre las diferentes estaciones.

Variable	Gradiente	Valor	Relación
Precipitación	Gradiente Morazán Chanrayo	373.6	mm/100 m
	Gradiente Morazán Albores	91.1	mm/100 m
	Gradiente Pasabien San Lorenzo	54.7	mm/100 m
	Gradiente Pancajoc Pinada	84	mm/100 m
	Gradiente Sepur San Marcos	315	mm/100 m
Temperatura	Gradiente Morazán Chanrayo	7.7	C/km
	Gradiente Pasabien San Lorenzo	11	C/km
	Gradiente Pancajoc Pinada	3.5	C/km
	Gradiente Sepur San Marcos	4.5	C/km
Evapotranspiración	Gradiente Morazán Chanrayo	850	mm/1000 m
	Gradiente Pasabien San Lorenzo	798	mm/1000 m
	Gradiente Pancajoc Pinada	140	mm/1000 m
	Gradiente Sepur San Marcos	183	mm/1000 m

Basado en estos gradientes obtenidos se procedió a dibujar las isolíneas respectivas para cada una de las variables analizadas (precipitación, temperatura y evapotranspiración), los mapas respectivos se describen y muestran a continuación.

i. Isoyetas

El comportamiento de las isoyetas (precipitación) del área de estudio se dividen, principalmente, en la zona sur (sotavento) y zona norte (barlovento). Para la zona norte las precipitaciones inician dentro del área de estudio en los 3200 mm anuales y puede alcanzar los 4800 mm en la parte alta, es la zona más lluviosa y con alta influencia de la humedad del Océano Atlántico.

La zona sur es menos húmeda y presenta precipitaciones desde los 800 mm en la parte baja en donde el clima es seco, en una franja que se extiende desde Morazán a lo largo del valle del Motagua. En tal sentido se encuentra en el área este de la zona un aumento de la precipitación, producto de las condiciones montañosas que superan los 3000 msnm, en donde la precipitación presumiblemente alcanza cerca de los 3000 mm (Figura 10).

ii. Isotermas (Celsius)

Las isolíneas de temperatura (isotermas) son similares en la Sierra de las Minas en la zona norte y sur, de tal forma que la temperatura más alta que se presenta en las partes más bajas es de 28 C, y la parte más alta tiene una temperatura promedio anual de 16 grados Celsius, tiene una disposición Oeste-Este.

Los gradientes de temperatura derivados son de 7.5 a 11 grados centígrados por kilómetro en la primera parte del ascenso y luego los gradientes bajan hasta 3.5 grados Celsius por kilómetro. Evidentemente, el gradiente más alto lo presenta el área localizada en el centro de la región sur (Figura 11).

iii. Isopletas

La evapotranspiración se deriva de la temperatura, por lo tanto, también muestra un comportamiento inversamente proporcional a la altura. Las isolíneas de evapotranspiración potencial (isopletas) presenta valores que alcanzan cerca de los 1800 mm anuales (5.5 mm diarios) en promedio en la parte más baja de la Sierra de las, conforme se asciende se disminuye la demanda climática reflejada en la evapotranspiración, hasta alcanzar valores cercanos a los 600 mm al año (2 mm diarios) (Figura 12).

MAPA DE ISOYETAS
Reserva de Biosfera Sierra de las Minas

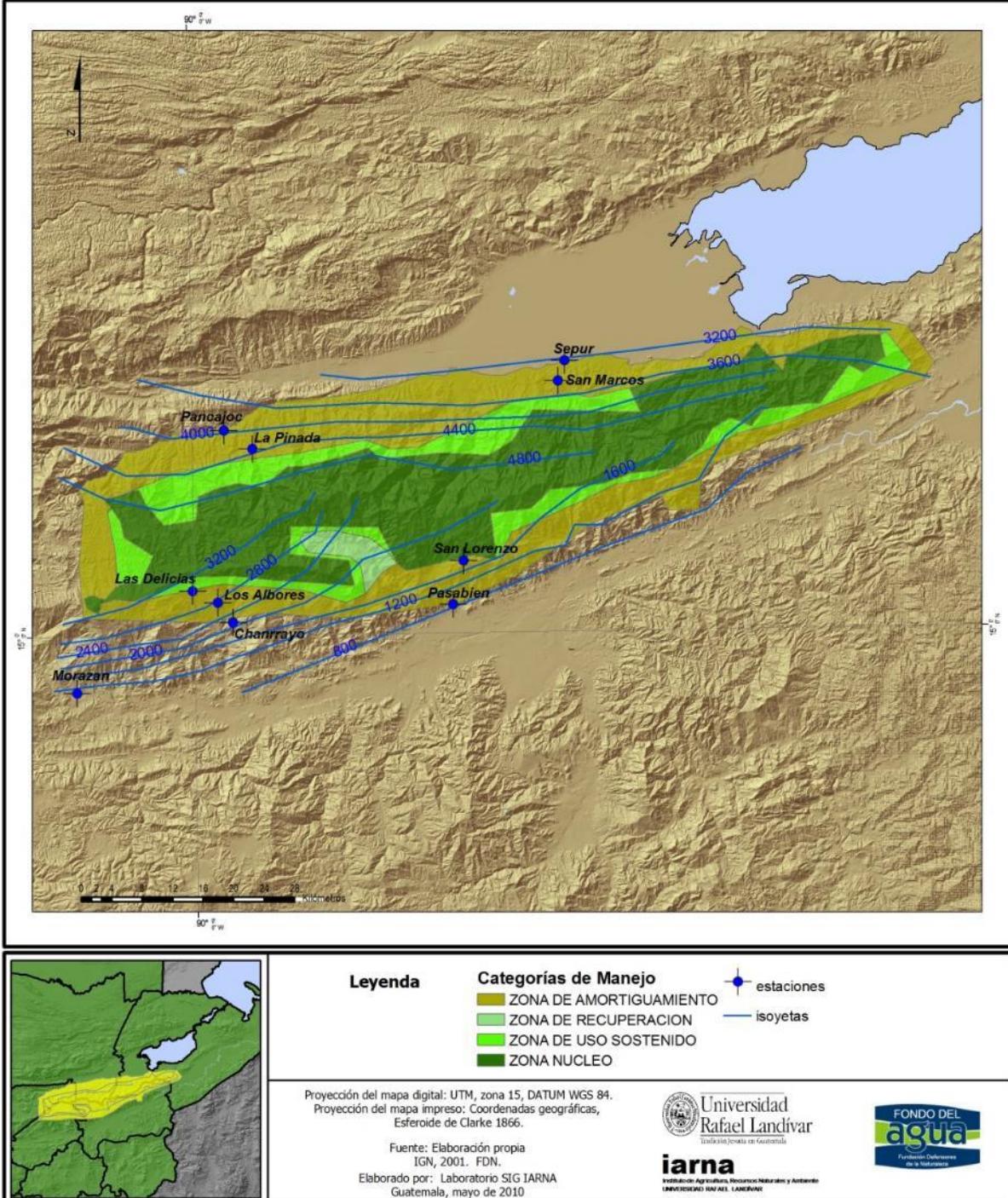
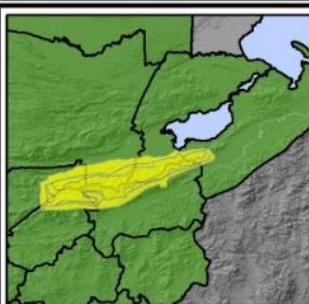
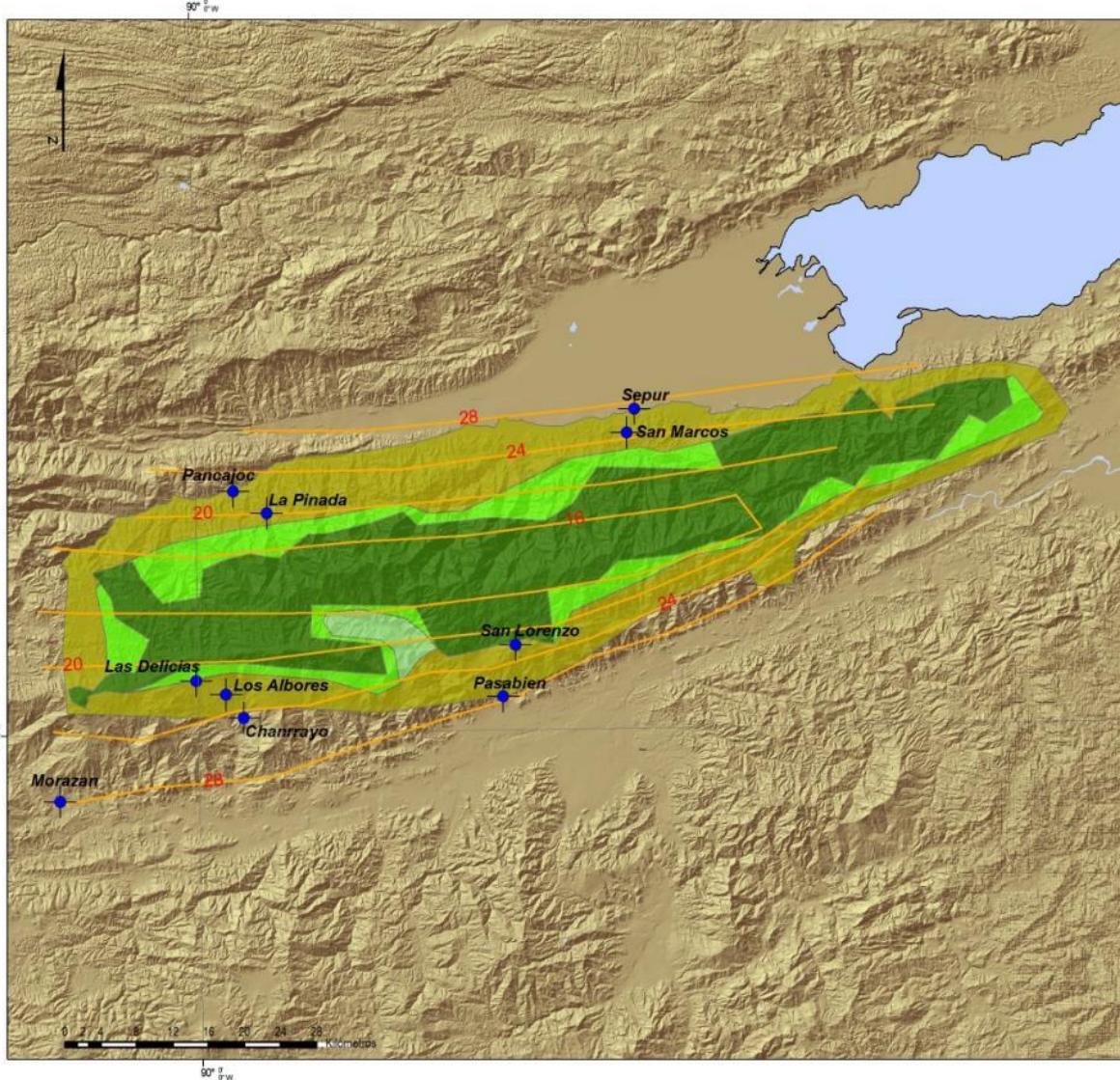


Figura 10. Isoyetas de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas

MAPA DE ISOTERMAS
Reserva de Biosfera Sierra de las Minas



Leyenda

- | | |
|--|------------|
| Categorías de Manejo | |
| ZONA DE AMORTIGUAMIENTO | estaciones |
| ZONA DE RECUPERACION | isotermas |
| ZONA DE USO SOSTENIDO | |
| ZONA NUCLEO | |

Universidad
 Rafael Landívar
Trabajo Joven en Guatemala

FONDO DEL
agua
Fundación Defensora de la Naturaleza

Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84.
 Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas,
 Esferoide de Clarke 1866.

Fuente: Elaboración propia
 IGN, 2001. FDN.

Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA
 Guatemala, mayo de 2010

Figura 11. Isotermas de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas

MAPA DE ISOPLETAS
Reserva de Biosfera Sierra de las Minas

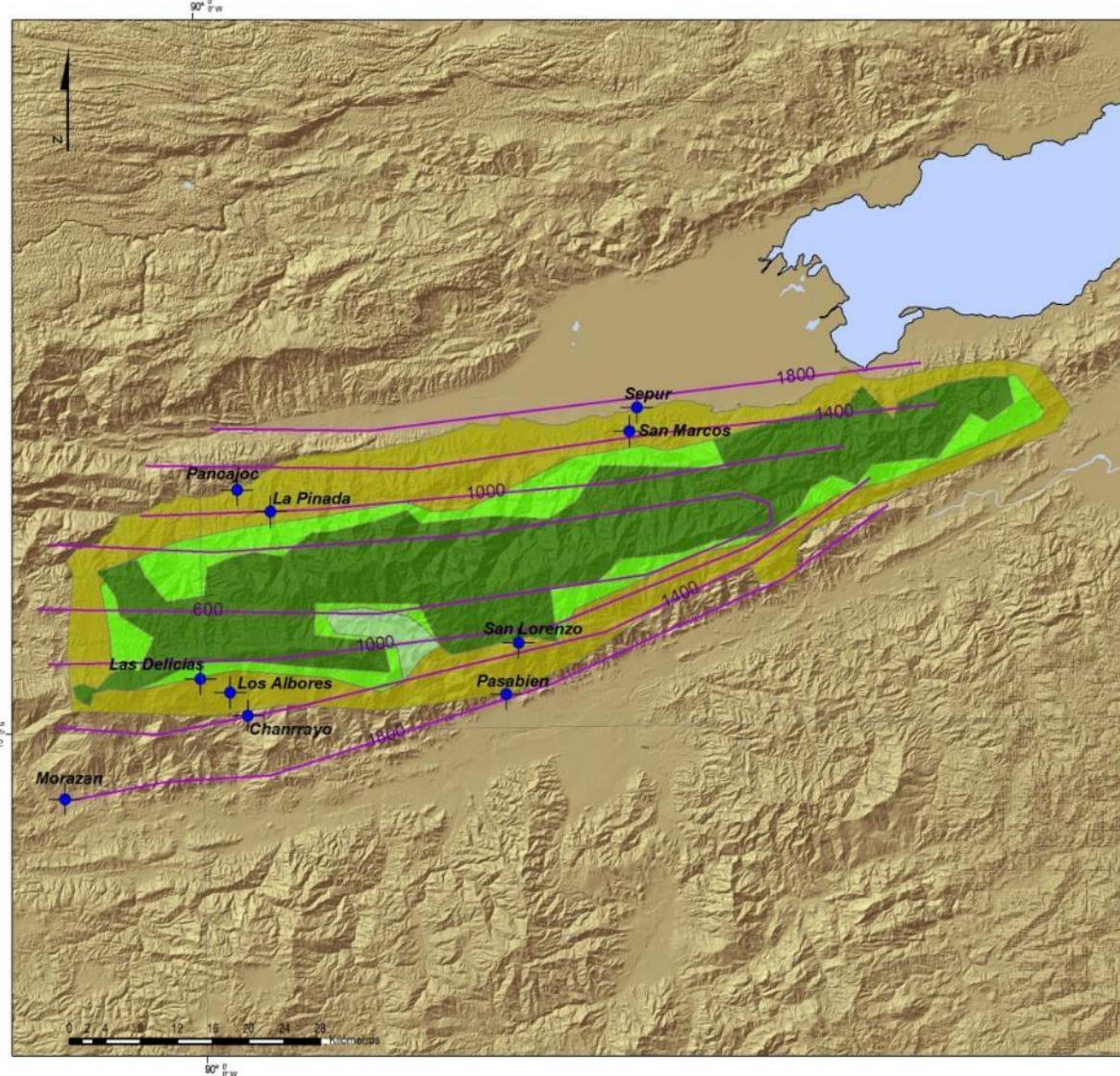


Figura 12. Isopletas de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas

3. Deducción de ecosistemas hidrológicamente homogéneos en la RBSM.

Comprender la distribución de la flora de una región es fundamental ya que “las comunidades vegetales y grupos ecológicos son el resultado de la acción conjunta e integrada de los factores del ambiente y, en tal sentido, actúan como indicadora” (Matucci & Colma , 1982)

Para caracterizar los ecosistemas de la RBSM se realizó una revisión exhaustiva de datos y estudios existentes y reportados por los herbarios de Guatemala (Herbario AGUAT y BIGUA, respectivamente, de las Facultad de Agronomía y Escuela de Biología, ambos de la Universidad de San Carlos de Guatemala).

Se procedió a realizar un listado tomando como referencia dichos trabajos y las observaciones de la Flora de Guatemala (Standley & Steyermark, 1964). Posteriormente se procedió a deducir las grandes regiones hidrológicamente homogéneas en la Sierra de las Minas de acuerdo a las características generales definidas por Bruijnzeel et al (Bruijnzeel, Kappelle, Mulligan, & Scatena, 2010; Bruijnzeel S. , 1999). Esta información fue útil para categorizar grandes regiones hidrológicamente homogéneas, por lo tanto, para inferir propiedades hidrológicas y, posteriormente, descrito en capítulos siguientes, realizar balances hídricos e inferencias geográficas con mayor rigurosidad.

a. Deducción teórica de los ecosistemas hidroclimáticamente homogéneos.

De acuerdo a la presencia de taxa florísticos se evidencia la presencia, a grandes rasgos, de los ecosistemas denominados comúnmente como bosque nuboso, bosque seco, bosque de pino encino y bosque latifoliado de tierras bajas. En tal sentido es recomendable adoptar la clasificación propuesta por Bruijnzeel (Bruijnzeel & Proctor, 1995; Bruijnzeel S., 1999; Bruijnzeel & Proctor, 1995), la cual es, siguiendo un gradiente altitudinal desde tierras bajas hacia tierras altas de montaña, la siguiente:

- a) Bosque latifoliado de tierras bajas (LMRF), este se distingue hidroclimáticamente por presentar valores relativamente más altos de temperatura (mayores a 18⁰ C promedio anual) y, consecuentemente de evapotranspiración potencial, así como precipitaciones generalmente de 2000 mm o más. Es destacable que la estacionalidad es menos marcada en este ecosistema, es decir, los déficit de precipitación en estación seca no son tan altos, siendo menores a 100 mm y dos o tres meses de déficit hídrico (ETP mayor a precipitación).
- b) Bosque nuboso tropical bajo (LMCF, por sus siglas en inglés), abundan epífitas, tales como el grupo de Bromeliacea, *Pinus Liquidamar* *Styraciflua*, *Mirsinácea*, etc.; este ecosistema se distingue por estar generalmente debajo de la base de las nubes que influencian los bosques montanos y presenta valores intermedios de temperatura, lluvias y evapotranspiración. Para el caso de la Sierra de las Minas este ecosistema está dominado por coníferas, tal como *Pinus Tecunumanii* o *P. pseudostrobus*.

Este ecosistema generalmente presenta un umbral de temperatura promedio anual de 18° C (Bruijnzeel, Kappelle, Mulligan, & Scatena, 2010). Este mismo umbral es el propuesto por Holdridge (1971) para la definición del Bosque Montano Bajo en latitudes tropicales y destaca la presencia de heladas. Precipitaciones mayores a 2000 mm y estar ubicado inmediatamente debajo de la influencia de la nubosidad.

- c) Bosque nuboso tropical de altura (UMCF), este ecosistema montano se distingue por recibir influencia directa del cinturón de nubes a lo largo del año, y, consecuentemente, con altos valores de precipitación neta (algunas veces mayor que la precipitación bruta por el aporte de intercepción del dosel de la vegetación), relativamente bajas temperaturas, baja evapotranspiración, baja radiación solar, alta humedad de los suelos. Los taxa indicadores son helechos arborescentes (Dicksoniaceae, Cyatheaceae, etc.) y musgos, así como ciertos grupos taxonómicos, tales como, Melastomaceae, Ericaceae, Winteraceae, Theaceae, Lauraceae, Ilicaceae, etc. Para el caso de la Sierra de las Minas este ecosistema está dominado por algunas especies de *Quercus spp*, especialmente *Quercus sapotaefolia*, *Q. Aaata* o *Q. crispifolia*. En adelante este ecosistema se denominará simplemente Bosque nuboso.

Hidroclimáticamente se caracteriza por precipitaciones mayores a 2000 mm, temperaturas promedio anuales inferiores a 18° C y la influencia directa de la nubosidad, es decir con valores altos de Humedad relativa.

- d) Bosque enano (EF, por sus siglas en inglés), o bosque de cimas, se distingue por vegetación con escaso crecimiento y suelos poco desarrollados. Esta región generalmente presenta los mayores valores de precipitación bruta, muy altos valores de precipitación neta (aumentado por la precipitación conducida por el viento), las más bajas temperaturas y bajos valores de evapotranspiración y radiación solar. Para fines de este trabajo, en adelante, se le denominará Bosque nuboso en una sola unidad con UMCF.

Para ilustrar esta propuesta se presenta la Figura 13, en donde se sobreponen las categorías florístico-climáticas a una sección transversal de geología propuesta Machorro (Machorro, 2010). Asimismo ésta clasificación está respaldada por otros estudios ecológicos, especialmente los realizados en esta región o que hacen referencia específica (Estrada, 1999; Gonzales, 1999; Medinilla, 1999; Rosito, 1999; Dix M. , 1993; Vargas, 2001).

De acuerdo al análisis de listados de plantas, revisión de literatura científica y visitas de campo se concluyó que si existe la capacidad de categorizar florísticamente los ecosistemas encontrados en la Sierra de las Minas, especialmente en la vertiente Norte (barlovento) (Bruijnzeel, Kappelle, Mulligan, & Scatena, 2010; Bruijnzeel & Proctor, 1995; Bruijnzeel S. , 1999). Sin embargo, se consideró insuficiente la información de literatura científica existente para categorizar adecuadamente la vertiente de sotavento ubicada hacia el sur de la RBSM. Para este fin realizó una propuesta original analizando las variables y parámetros propuestos por Bruijnzeel junto con otros científicos en 2010 (Bruijnzeel, Kappelle, Mulligan, & Scatena, 2010). De esta forma se evidenció la carencia de información científica existente para la región de sotavento, sin embargo se logró deducir diferentes categorías de los

principales ecosistemas. Es de mencionar que se utilizó de referencia estudios realizados en esta región (Medinilla, 1999; Rosito, 1999; Dix M. , 1993).

Derivado de lo anterior se propone la categorización de ecosistemas en la vertiente Pasabien (sur) o sotavento, el cual es mostrado en la Figura 13. En este sentido se agregan a la vertiente de sotavento LMHF, Lower Montane Humid Forest (Bosque húmedo montano bajo); y LMDF Lower Montane Dry Forest (Bosque seco montano bajo, de acuerdo a zonas de vida de Holdridge, podría ser premontano la zona altitudinal/latitudinal).

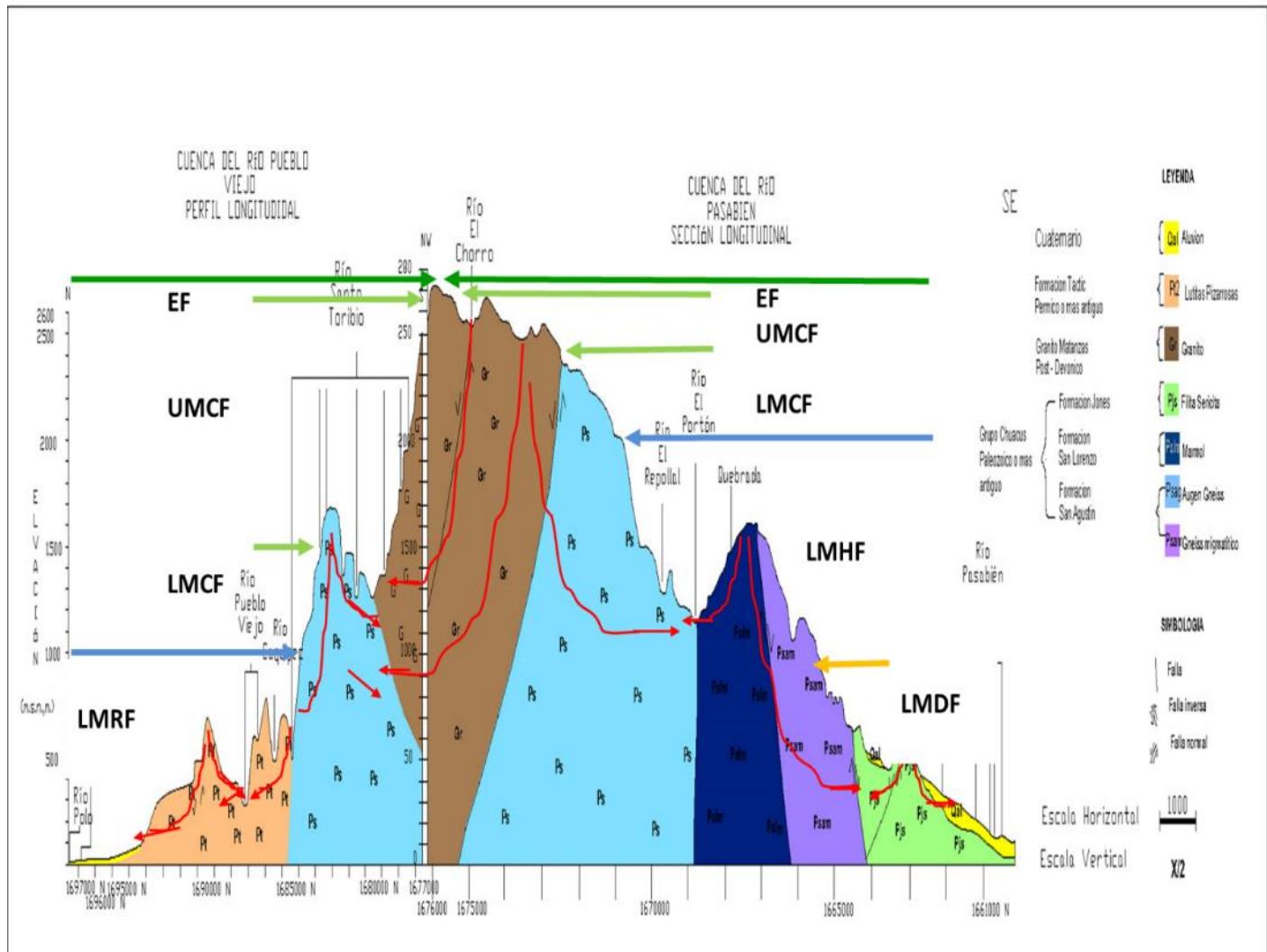


Figura 13. Distribución altitudinal y longitudinal de los ecosistemas vegetales sobrepuerto en un transecto entre las cuencas Pueblo Viejo y Pasabien

Fuente: Elaboración propia sobrepuerto a transecto hidrogeológico propuesto por (Machorro, 2010). LMRF Lower Montane Rain Forest y LRF Lowlands Rain

Forest (Bosque lluvioso montano premontano y Bosques lluviosos de tierras bajas); LMCF: Lower Montane Cloud Fores (Bosque nuboso montano bajo); UMCF: Upper Montane Cloud Forest (Bosque nuboso de montaña alta); EF: Elfin Forest (Bosque enano); LMHF,

Lower Montane Humid Forest (Bosque húmedo montano bajo); y LMDF Lower Montane Dry

Forest (Bosque seco montano bajo, de acuerdo a zonas de vida de Holdridge, podría ser premontano la zona altitudinal/latitudinal)

- e) Bosque húmedo montano bajo (LMHF, por sus siglas en inglés) que es una faja con valores entre 2000 y 1000 mm precipitación promedio anual, sin llegar al umbral de 18 ° C de temperatura ni ocurrencia de heladas. Seis meses sin valores altos de precipitación (noviembre-abril), es decir una estacionalidad muy pronunciada. Las especies indicadoras y dominantes de este ecosistema son *Pinus oocarpa* y *Quercus crispifolia*. En adelante a este ecosistema se le denominará Bosque pino encino.
- f) Bosque seco montano bajo (de acuerdo a zonas de vida de Holdridge, podría ser premontano su zona altitudinal/latitudinal) (LMDF, por sus siglas en inglés). Este ecosistema se caracteriza por precipitaciones menores a 1000 mm y una estacionalidad muy marcada con seis meses sin precipitaciones significativas y temperaturas mayores a los 24° C. Estos umbrales climáticos muestran vegetación no conífera.

En cuanto las relaciones hidro-climáticas de estos ecosistemas, es interesante apreciar que el ecosistema UMCF coincide con la asociación geológica de granito, el cual es un material muy duro y poco intemperizado, sugiriendo que históricamente las lluvias son de baja intensidad. Aunado a la conformación de especies dependientes de alta humedad relativa constante (epífitas), relativamente bajas temperaturas (Bruijnzeel & Proctor, 1995), es de esperar que se presenten valores positivos de balances hídricos durante nueve o más meses al año (Brown & De la Roca, 1996). Por lo tanto estos son ecosistemas especializados en la captación hidrológica, incluso para la estación seca (Bruijnzeel, Kappelle, Mulligan, & Scatena, 2010).

De forma contrastante se encuentra, probablemente promovido por procesos naturales de metamorfismo regional, materiales geológicos de augen gneiss y gneiss migmatítico, los cuales son rocas metamórfica derivada del granito pero con mayor grado de intemperización. Esto sugiere que las condiciones de intensidades de lluvia pueden ser mucho mayores en este sitio. Estos ecosistemas son diferenciados en cuanto su composición florística, el primero es un bosque latifoliado y el segundo ecosistema es un bosque dominado por pinos. Los cuales, a su vez, también sugiere una estación seca bien definida al ser estos ecosistemas especies mejor adaptadas a la estacionalidad marcada y suelos menos desarrollados. Esto confirma los hallazgos de Rosito (Rosito, 1999) y Medinilla (Medinilla, 1999) en cuanto a que en la Sierra de las Minas la composición florística y la estructura están fuertemente influenciadas por el material geológico y la distribución biogeográfica de los taxones. Es de recordar que las especies de coníferas se han desarrollado en regiones templadas que se caracteriza por marcada estacionalidad.

4. Selección de subcuencas representativas de la RBSM.

Se puede afirmar que la RBSM reúne atributos biofísicos y sociales para ser considerado como un sitio estratégico a nivel local, nacional e incluso de la región mesoamericana. Los atributos biofísicos destacables son tanto biológicos (mayor ecosistema de bosque nuboso continuo de Mesoamérica y altos niveles de endemismos), como ecológicos e hidrológicos (provisión de servicios ecosistémicos críticos como la regulación hidrológica de la que se benefician más de 300,000 personas e industrias).

En tal sentido se define como asunto prioritario recopilar o generar datos e información, organizarla y analizarla de tal manera que se puedan generar instrumentos técnicos, legales, financieros etc., que sean adecuados e innovadores para la conservación de esta área protegida y su área de influencia. Esto último es considerado fundamental por la entidad que define directrices para la administración del territorio (Defensores de la Naturaleza, 2004).

Para tal fin se priorizaron cuatro subcuencas, las cuales se pueden consideradas como representativas de la RBSM por su ubicación geográfica. Estas mismas unidades hidrológicas reúnen condiciones que son definidas como estratégicas por FDN y otros actores locales y nacionales, ya que, por ejemplo, han sido priorizadas para la implementación de esquemas de pago por servicios ambientales (WWF, 2007) o, en el caso del subcuenca San Jerónimo, ya se está implementando esquemas locales para la gestión de recursos hídricos y ordenamiento territorial que incluyen acuerdos sociales reconocidos por los principales actores a lo largo de la cuenca, desde organizaciones de regantes, municipalidad, FDN, comunidades, hogares, entre otros (Defensores de la Naturaleza, 2004). Dichos esquemas de conservación requieren de información científica detallada para fundamentarlos, así como para su evaluación, de tal manera que sea sostenible en el tiempo.

Bajo este contexto existe otra ventaja, la cual es que ya se cuenta con caracterizaciones generales y, en algunos casos, preinversión, para el ordenamiento del uso del agua, por ejemplo para riego e hidroeléctricas. Por todo lo anterior se escogieron las siguientes subcuencas; San Jerónimo (noroeste, transición entre barlovento y sotavento de la cadena montañosa Sierra de las Minas), Pueblo Viejo (vertiente norte, barlovento), Teculután y Pasabien (ambas en vertiente sur, sotavento) (Defensores de la Naturaleza, 2004; WWF, 2007).

A continuación se describen de manera general las cuatro subcuencas definidas como estratégicas, de acuerdo a su ubicación hidrográfica. Se inicia con la ubicación de cada una de éstas subcuencas, se define su distribución de acuerdo al área protegida y su zonificación. Se define su distribución político administrativa (departamentos y municipios de Guatemala). Además se describen la distribución de principales unidades ecohidrológicas de análisis de las subcuencas, tal como los ecosistemas homogéneos hidrológicamente y microcuencas, haciendo referencia a algunos aspectos hidrográficos relevantes. Esta clasificación territorial es fundamental para la realización de balances hídricos de suelos, los cuales se desarrollan en acápite posteriores.

Finalmente, como un indicador clave para definir su estado de conservación y de presión humana se presenta como un indicador clave la dinámica forestal 2001-2007.

a. Descripción de cuencas ubicadas en sotavento

A continuación se describen brevemente las cuencas ubicadas en la región de sotavento, Pasabien y Teculután. Mediante el uso del indicador de dinámica forestal se pretende definir su estado de conservación y cumplimiento de los objetivos de conservación de la RBSM.

Subcuenca Pasabien

La subcuenca Pasabien se ubica en los departamentos de Zacapa y Alta Verapaz, entre coordenadas Latitudes N 15.15° y 15.01° y Longitudes O 89.76° y 89.64°, se ubica hidrológicamente en la cuenca del río Motagua, sus colindancias hidrológicas son al norte y parte alta con la subcuenca del río Pueblo Viejo de la cuenca del río Polochic, al Oeste con la subcuenca Teculután y al Este con la subcuenca Río Hondo y al sur con el área de captación, estas tres referencias de la cuenca del río Motagua.

La subcuenca tiene una extensión de 10,085 ha, se distribuye en los municipios de Río Hondo 9,359 hectáreas (92.8%), Teculután 444 hectáreas (04.4%) y Panzós 282 (02.8%) del departamento de Alta Verapaz. Tiene altitudes desde 180 msnm cuando se une con el río Motagua y hasta los 2,987 msnm, dentro de la subcuenca se ubica un embalse para generación eléctrica a 800 msnm. Cerca del 90% de su superficie está definida como área protegida especialmente zona núcleo y de amortiguamiento).

En la Figura 14 se puede apreciar la distribución geográfica de las tres principales categorías de zonas hidrológicamente homogéneas (descritas en acápite anteriores), siendo estas tres grandes regiones, las cuales en orden ascendente de altitud son: a) LLDF: Lowland dryforest (bosques secos de tierras bajas); b) LMHF, Lower Montane Humid Forest (Bosque húmedo montano bajo) y LMCF: Lower Montane Cloud Forest (Bosque nuboso montano bajo); c) UMCF: Upper Montane Cloud Forest (Bosque nuboso de montaña alta). En la Figura 15 se aprecian las siete subcuenca definidas para su estudio, estas subcuenca son: El Chorro, Portón, Repollal, Zunzapote, Ranchitos, Pasabien y Repollal-Portón. La longitud del cauce principal es de 29 Km con un pronunciado gradiente altitudinal en la parte media de la cuenca.

Posteriormente se presentan (Figura 16), la dinámica forestal de la cuenca distribuida por cada una de las microcuencas establecidas. En esta puede apreciar que la tasa de deforestación es negativa, es decir que existe recuperación de la cobertura forestal del suelo. El análisis de la dinámica forestal puede considerarse como un buen indicador del adecuado cumplimiento de los objetivos de conservación del área protegida.

Subcuenca Teculután

La subcuenca del río Teculután se ubica en el departamento de Zacapa, entre coordenadas Latitudes N 15.165° y 14.963° y Longitudes O 89.919° y 89.7°, drena directamente en la cuenca del río Motagua, sus colindancias hidrológicas son al norte y parte alta con las subcuenca del río Pueblo Viejo y Matanzas de la cuenca del río Polochic, al Oeste con la subcuenca Matanzas, Uyus, Güijo y La Palmilla; y al Este con la subcuenca Pasabien.

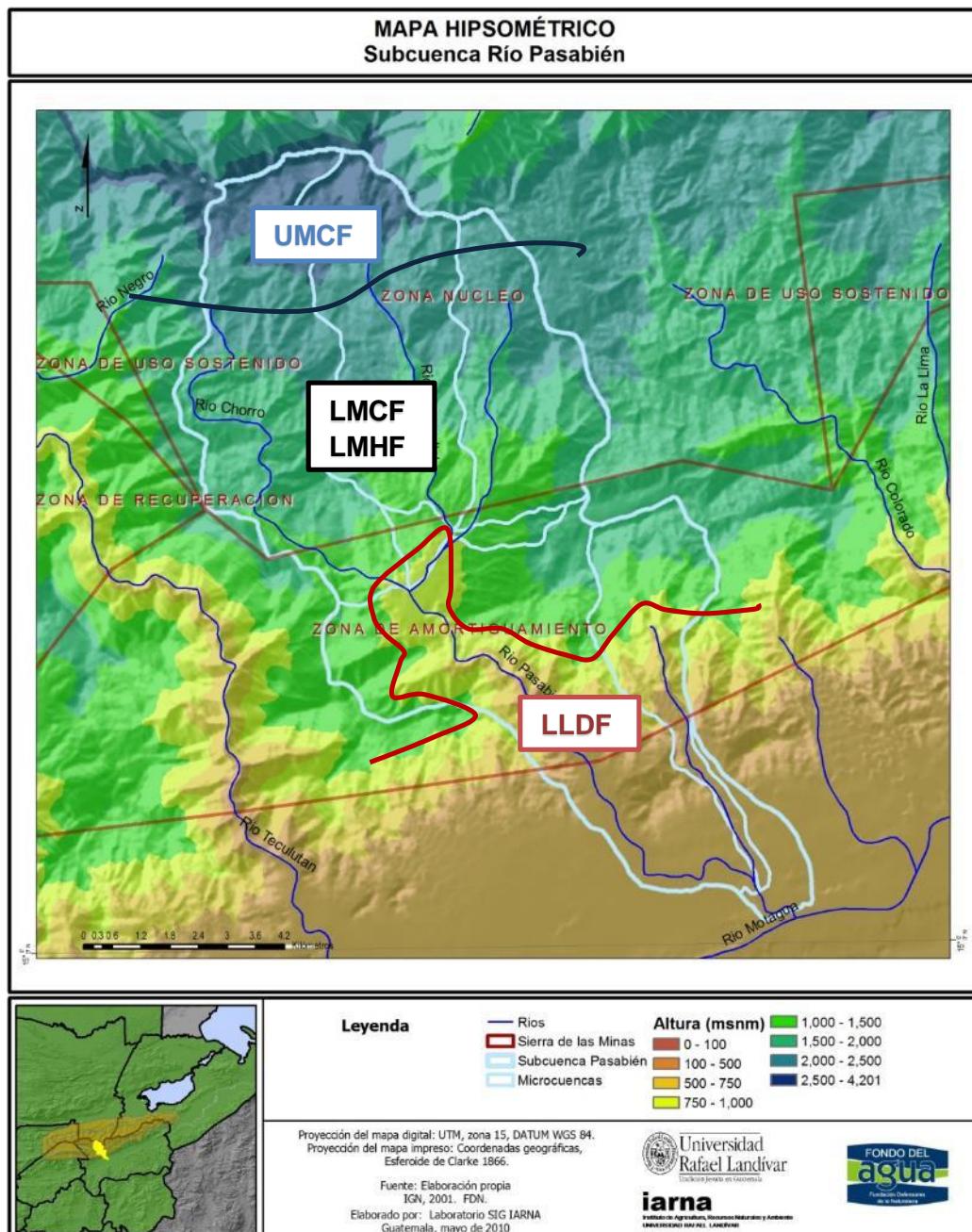


Figura 14. Ecosistemas hidrológicamente homogéneos y áreas de conservación de la RBSM.

MAPA DE MICROCUENCAS
Subcuenca Río Pasabién

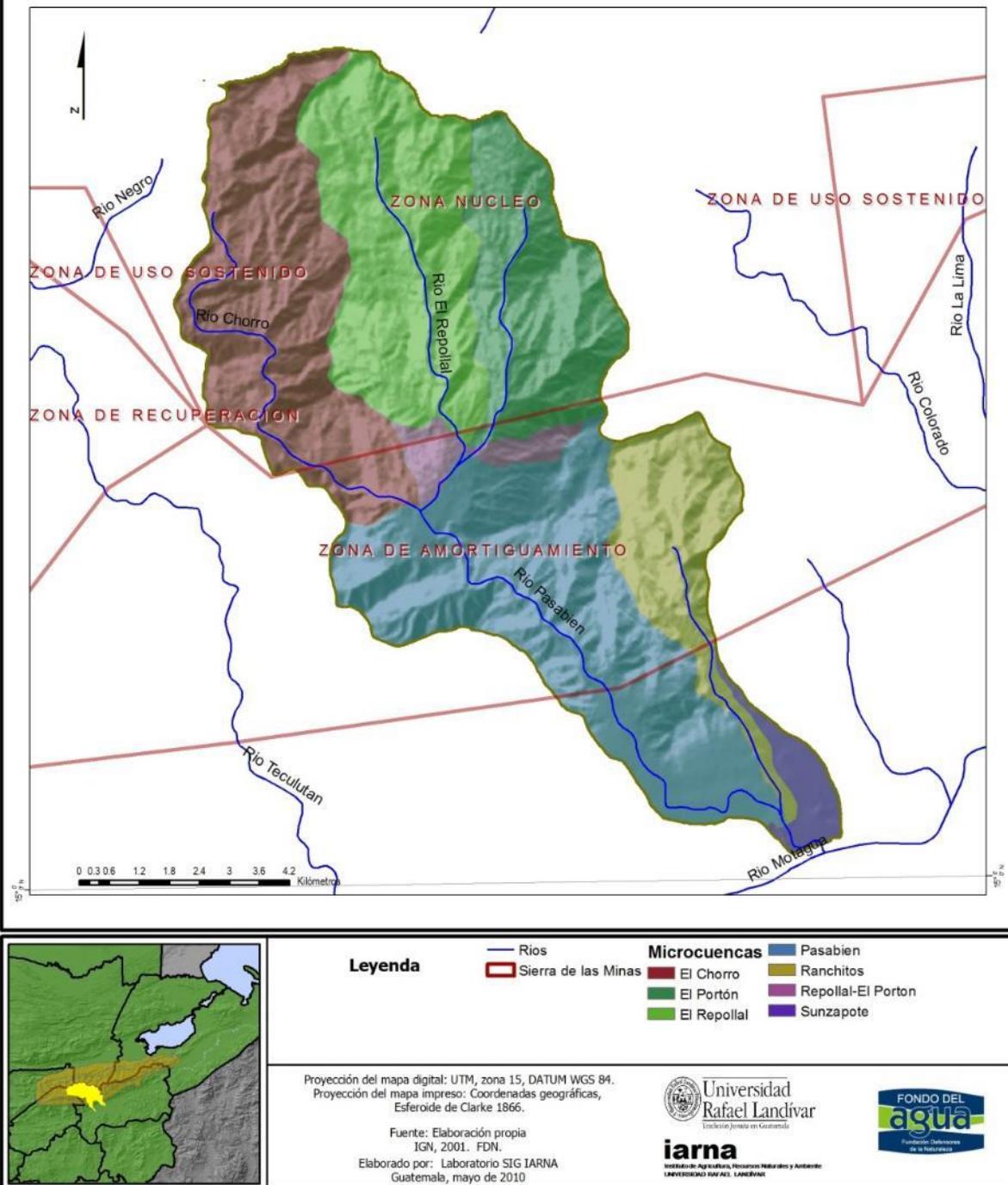
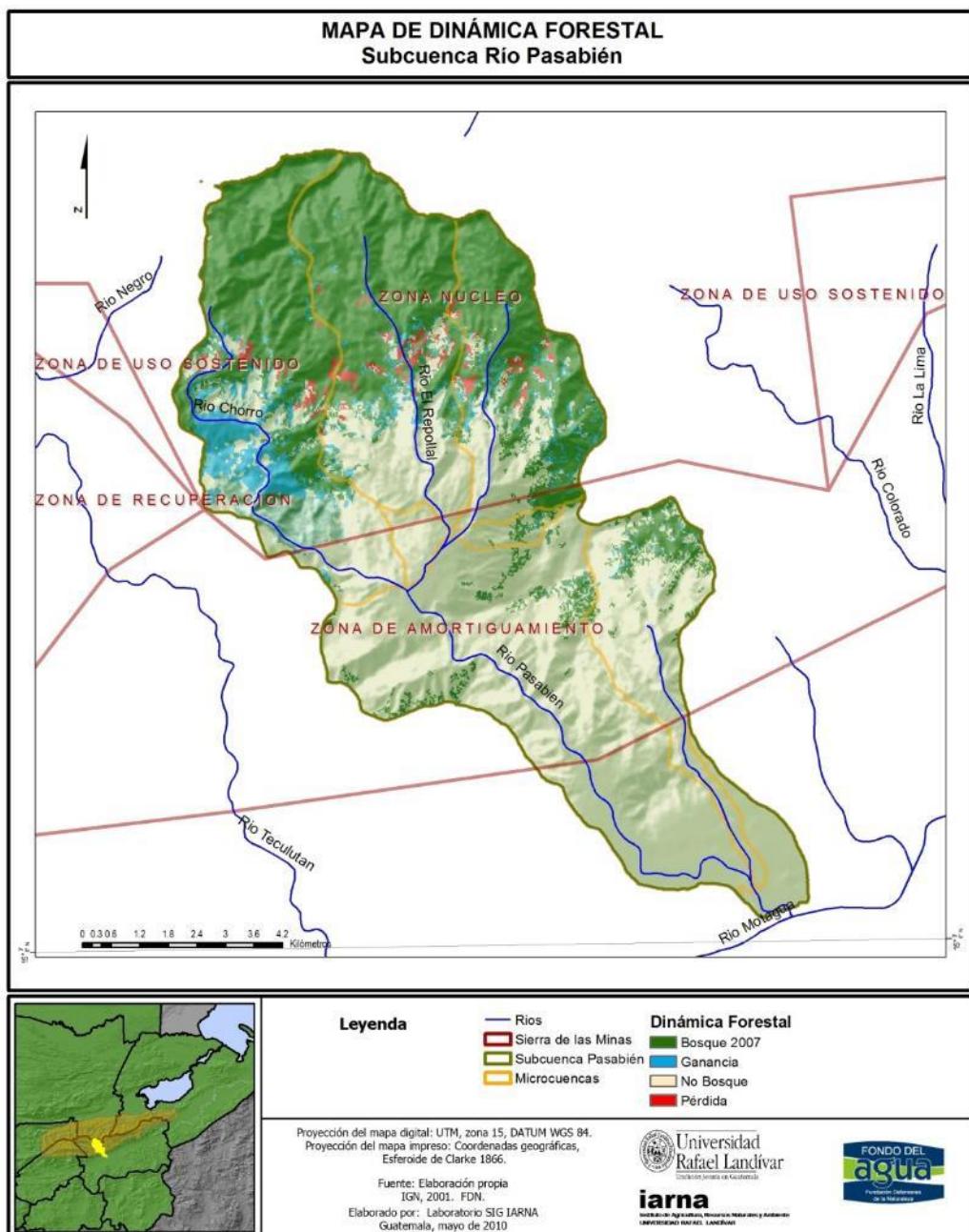


Figura 15. Microcuenca de la subcuenca Pasabien



Microcuenca	Bosque 2001	Bosque 2007	Pérdida	Ganancia	Pérdida Neta	Tasa anual de deforestación %
	ha					
El Chorro	1,164	1,674	45	340	(295)	-
El Portón	900	945	45	90	(44)	-
El Repollal	1,280	1,313	61	90	(29)	-
Pasabien	116	122	2	5	(4)	-
Ranchitos	150	169	3	14	(11)	-
Repollal-El Porton	16	19	0	2	(2)	-
Sunzapote	-	-	-	-	-	-
Total general	3,625	4,243	156	541	(384)	-

Figura 16. Dinámica forestal de la subcuenca Pasabien

La subcuenca tiene una extensión de 20,102 hectáreas, se ubica en los municipios de Teculután 18,100 ha (cerca del 90%) y San Agustín Acasaguastlán, aproximadamente 2,000 ha (cerca del 10 %), en los Departamentos de Zacapa y Progreso, respectivamente. Presenta altitudes entre 280 y casi 3000 msnm. La subcuenca presenta todas las categorías de zonificación de la RBSM, estas son Zona núcleo (aproximadamente el 35%), Zona de uso sostenido (9%), Zona de amortiguamiento (cerca del 21%), Zona de recuperación (cerca del 35%).

En la Figura 17 se puede apreciar la distribución geográfica de las tres principales categorías de zonas hidrológicamente homogéneas, siendo estas tres grandes regiones, las cuales en orden ascendente de altitud son: a) LLDF: Lowland dryforest (bosques secos de tierras bajas); b) LMHF, Lower Montane Humid Forest (Bosque húmedo montano bajo) y LMCF: Lower Montane Cloud Forest (Bosque nuboso montano bajo); c) UMCF: Upper Montane Cloud Forest (Bosque nuboso de montaña alta).

En la Figura 18 se puede apreciar las cinco microcuenca establecidas para su estudio, estas subcuenca son: Blanco, Las Vegas, Bandera, Teculután alto y Teculután. Posteriormente en la Figura 19 se muestra la dinámica forestal de la cuenca distribuida por cada una de las microcuenca anteriormente establecidas. El cauce principal tiene una longitud de 46,698 metros (46.698 km). Presenta una densidad de drenaje de 0.23 km/km².

Tal como en la subcuenca Pasabien, se puede apreciar que la tasa de deforestación es negativa, es decir que existe recuperación de la cobertura forestal del suelo. La dinámica forestal evidencia un aparente cumplimiento de los objetivos del área protegida.

b. Descripción de la subcuenca San Jerónimo ubicada en la zona de transición entre sotavento y barlovento.

La subcuenca del río San Jerónimo se ubica en los departamentos de Baja Verapaz y El Progreso, entre coordenadas Latitud N 790957 y 820420 y Longitud O 1679634 y 1664234, se ubica hidrológicamente en la cuenca del río Chixoy que drena al Golfo de México.

Sus colindancias hidrológicas son al Norte y Este (parte alta) con la subcuenca del río Matanzas, al Oeste con la subcuenca del río Salamá y al Sur con las subcuenca río Morazán, Comaja y Hato. La subcuenca tiene una extensión de 23,018 ha, se encuentra ubicada, principalmente, en los municipios de San Jerónimo (13,231.6 ha, 57.5 %) y Salamá (5,283.84 ha, 23 %), ambos en el departamento de Baja Verapaz. Además se distribuye en dos municipios del departamento de El Progreso, los cuales son, Morazán (4,375.07 ha, 19.01 %) y San Agustín Acasaguastlán (127.83 ha, 0.56%).

Respecto a la cobertura de las diferentes zonas del área protegida, se puede evidenciar que cerca del 56% está fuera de RBSM, Zona núcleo (8.5%), Zona de amortiguamiento (22%), Zona de usos múltiples (13.5%).

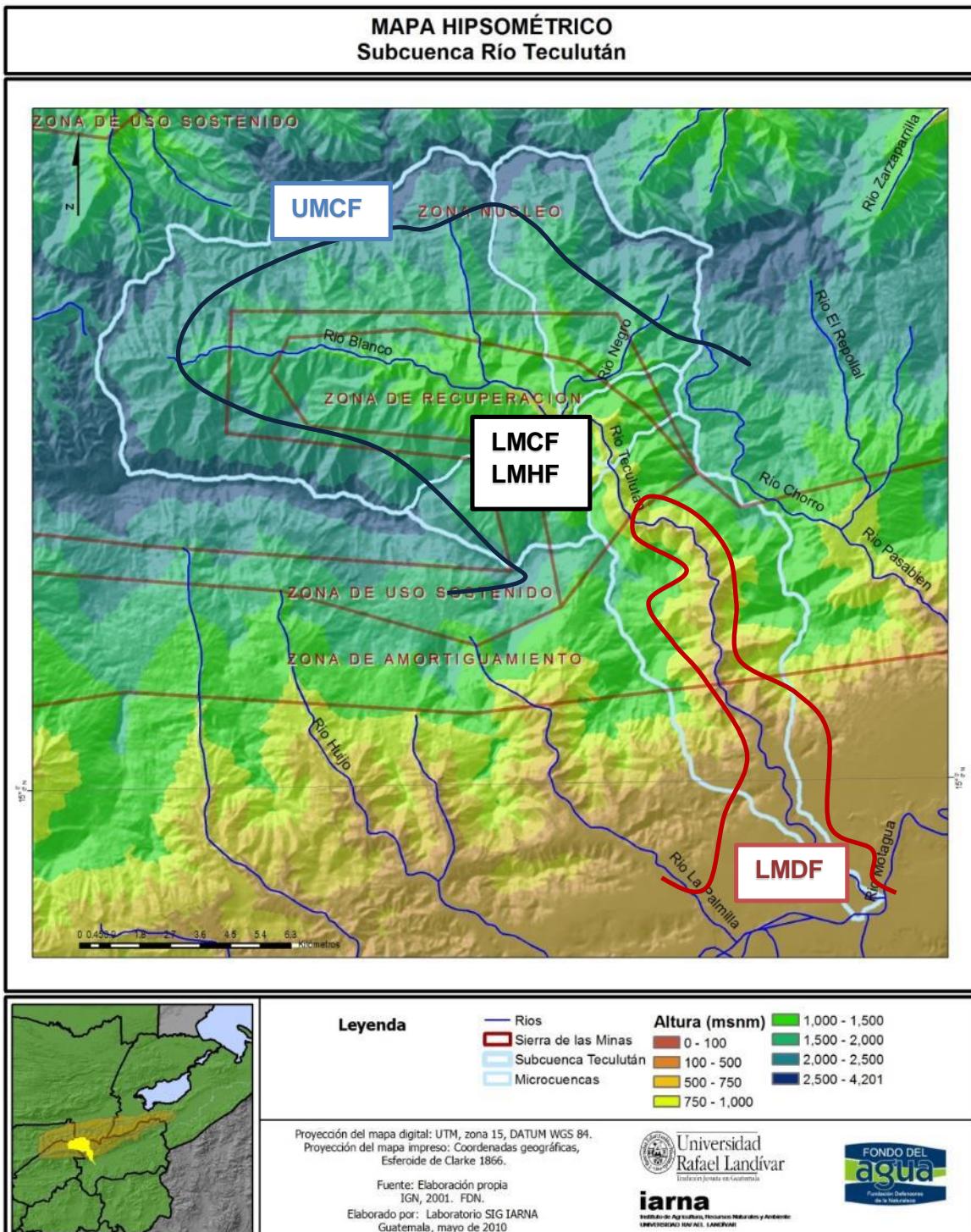


Figura 17. Ecosistemas hidrológicamente homogéneos en la subcuenca Tecolután.

MAPA DE MICROCUENCIAS
Subcuenca Río Teculután

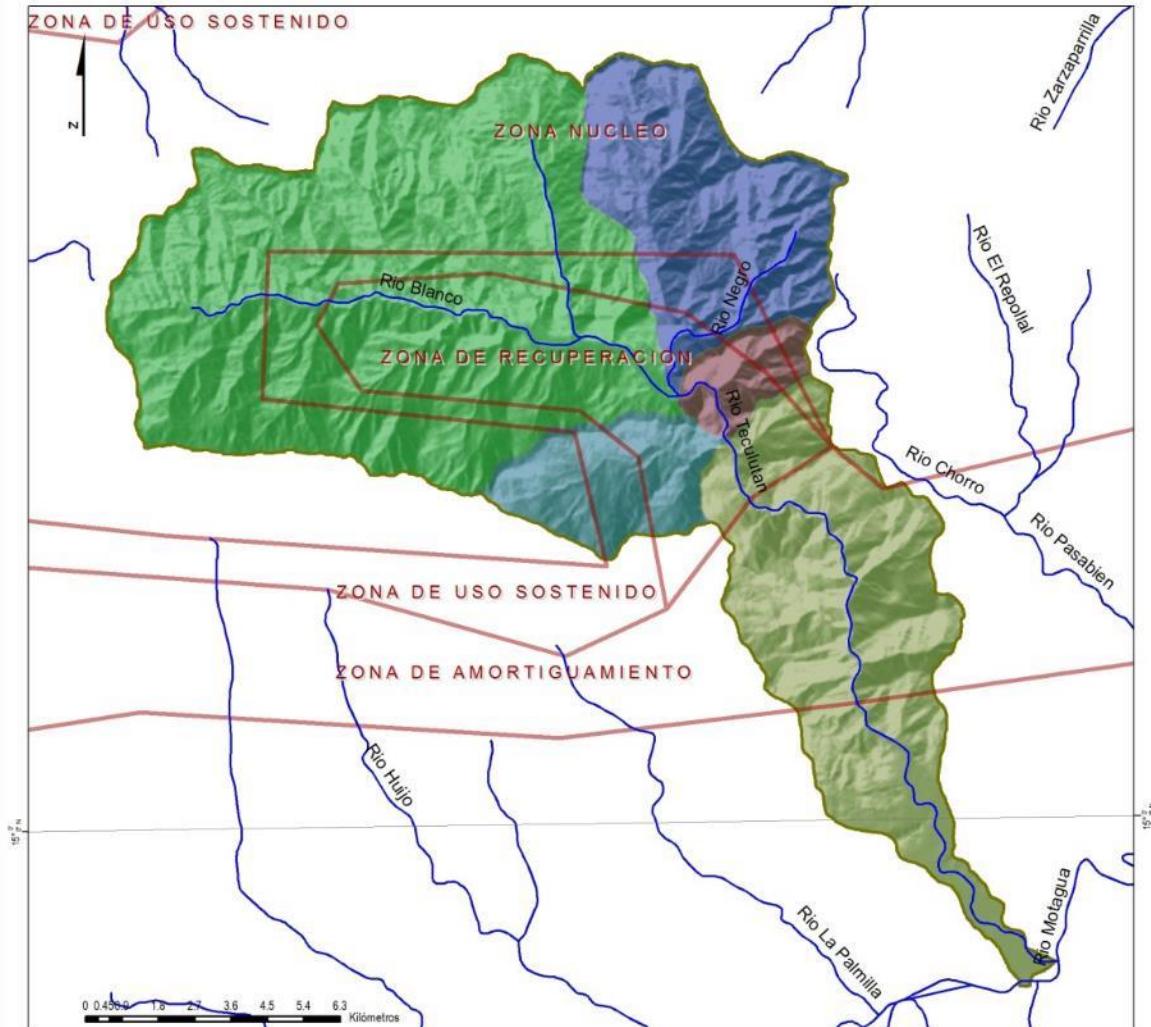
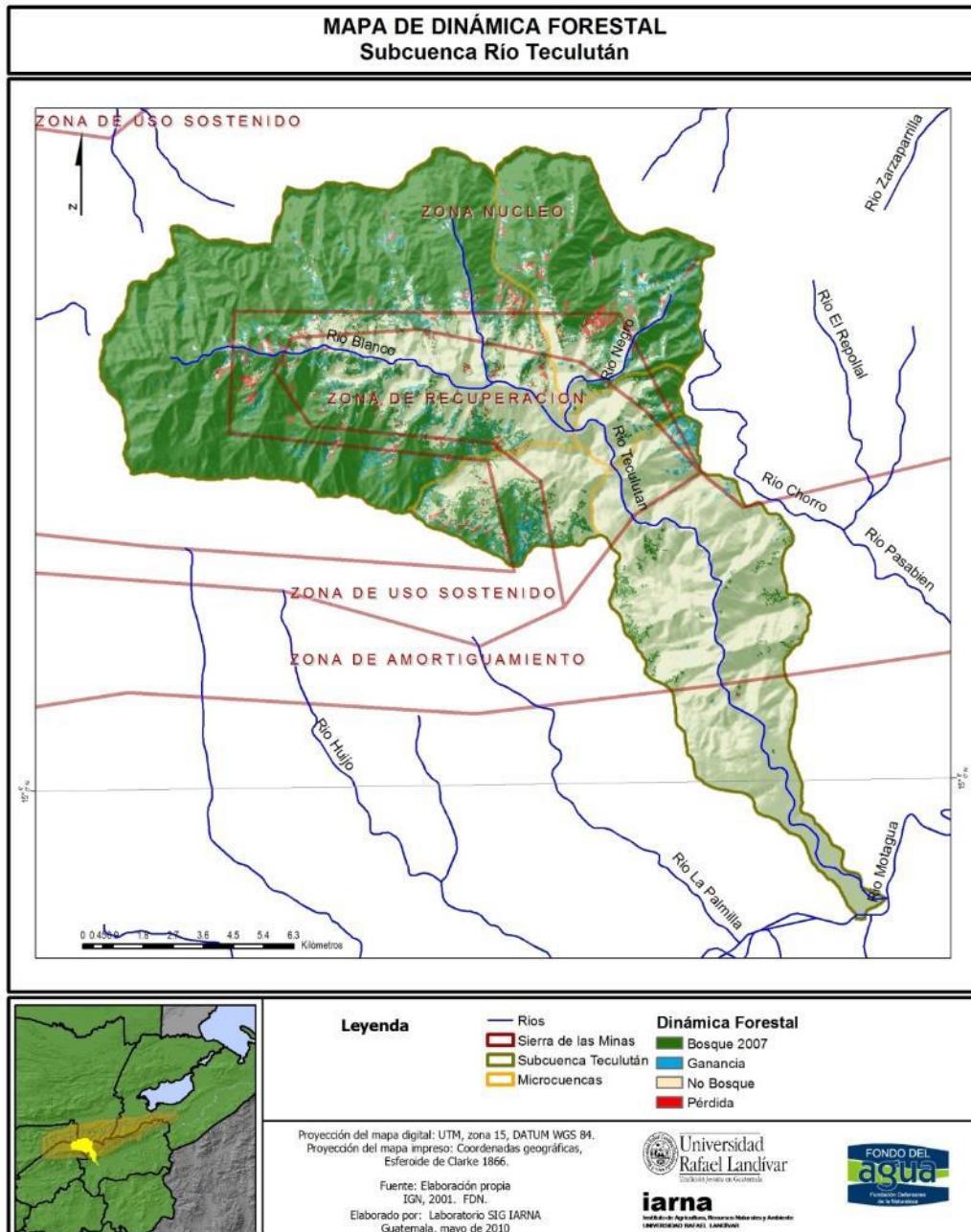


Figura 18. Microcuencas de la subcuenca Teculután



Microcuenca	Bosque 2001	Bosque 2007	Pérdida	Ganancia	Pérdida Neta	Tasa anual de deforestación
	ha					
Bandera perdida	461	540	40	119	(78)	-
Blanco	7,548	7,857	212	490	(278)	-
Las Vegas	2,379	2,465	114	195	(82)	-
Teculután	143	245	1.8	71	(69)	-
Teculután Alto	144	166	4.4	25	(21)	-
Total general	10,675	11,273	372	900	(528)	-

Figura 19. Dinámica forestal 2001-2007 para la subcuenca Teculután

En la Figura 20 se puede apreciar la distribución geográfica de las tres principales categorías de zonas hidrológicamente homogéneas, siendo estas tres grandes regiones, las cuales en orden ascendente de altitud son: a) LLDF: Lowland dryforest (bosques secos de tierras bajas); b) LMHF, Lower Montane Humid Forest (Bosque húmedo montano bajo) y LMCF: Lower Montane Cloud Forest (Bosque nuboso montano bajo); c) UMCF: Upper Montane Cloud Forest (Bosque nuboso de montaña alta).

En la Figura 21 se puede apreciar las diez microcuenca establecidas para su análisis, estas subcuenca son: El Homito, San Isidro, Matanzas, Matanzas-Santa Bárbara, Santa Bárbara, San Jerónimo Alto, San Jerónimo Bajo, Las Flautas, Tasquehuite y Concepción-Santa Cruz. Es importante mencionar que dentro de la subcuenca se ubican tres hidroeléctricas que generan alrededor de 10 MW cada una.

Posteriormente en la Figura 22 se muestra la dinámica forestal de la cuenca distribuida por cada una de las microcuenca anteriormente establecidas. El punto más bajo de la subcuenca se encuentra a una altitud de 950 msnm, cuando se une con el río Salamá, y el más alto es 2,700 msnm, en la parte alta de la Sierra de las Minas.

A diferencia de las anteriores subcuenca, se puede apreciar que la tasa de deforestación es positiva (Figura 22). Se evidencia una alta tasa de deforestación, especialmente en las microcuenca ubicadas en la parte media y baja de la subcuenca, especialmente la microcuenca Matanzas con 3.21% de tasa de deforestación anual. Esta deforestación está directamente relacionada con la protección legal, como área protegida, de las microcuenca.

c. Descripción de la subcuenca Pueblo Viejo ubicada en barlovento.

La subcuenca Pasabien se ubica en el departamento de Alta Verapaz, entre coordenadas Latitudes N 15.15° y 15.19° y Longitudes O 89.75° y 89.79°, drena a la cuenca del río Polochic, sus colindancias hidrológicas son al norte la parte baja del río Polochic al sur la parte alta del río Pasabien y subcuenca Teculután y al Este con la subcuenca Río Zarco.

La subcuenca tiene una extensión de 11,025 ha, se distribuye en el municipio de La Tinta y Panzós 282 del departamento de Alta Verapaz. Tiene altitudes desde 220 msnm cuando se une con el río Polochic y hasta los 2,987 msnm (Cerro Raxón). Cerca del 93% de su superficie está definida como área protegida, siendo un poco más del 50% área núcleo de la RBSM.

En la Figura 23 se puede apreciar la distribución geográfica de las tres principales categorías de zonas hidrológicamente homogéneas (descritas en acápite anteriores), siendo estas tres grandes regiones, las cuales en orden ascendente de altitud son: a) LLRF: Lowland rainforest (bosques lluviosos de tierras bajas); b) LMCF: Lower Montane Cloud Forest (Bosque nuboso montano bajo); c) UMCF: Upper Montane Cloud Forest (Bosque nuboso de montaña alta). En la Figura 24 se aprecian las siete subcuenca definidas para su estudio, estas subcuenca son: Pueblo Viejo alto, Pueblo Viejo, Pueblo Viejo, Santo Toribio, Quebrada Cancó, Río Chiquito y Raxón Tzunún. La longitud del cauce principal es de 30 Km con un pronunciado gradiente altitudinal en la parte alta de la subcuenca.

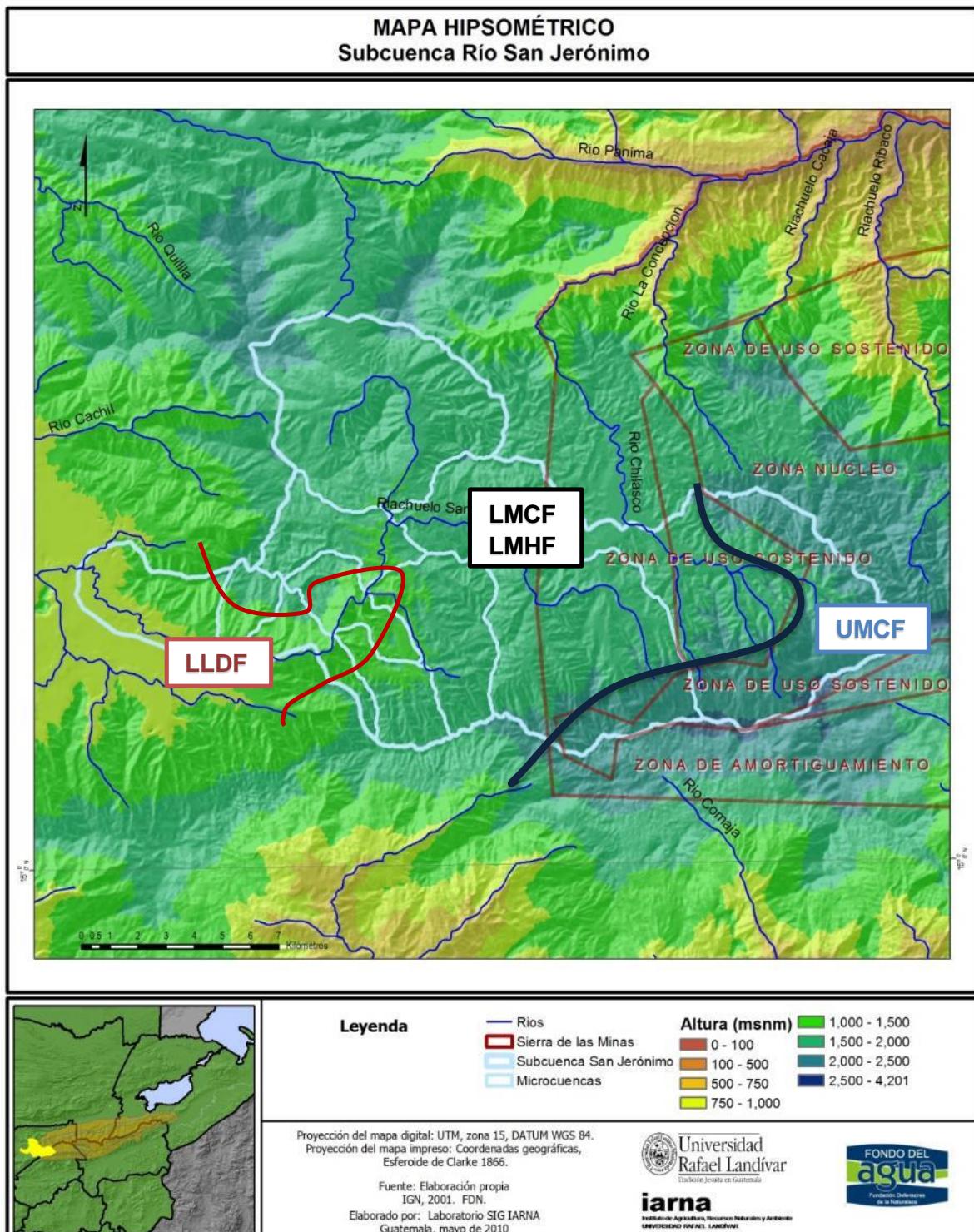
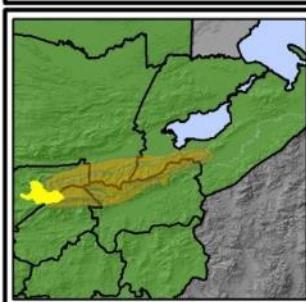
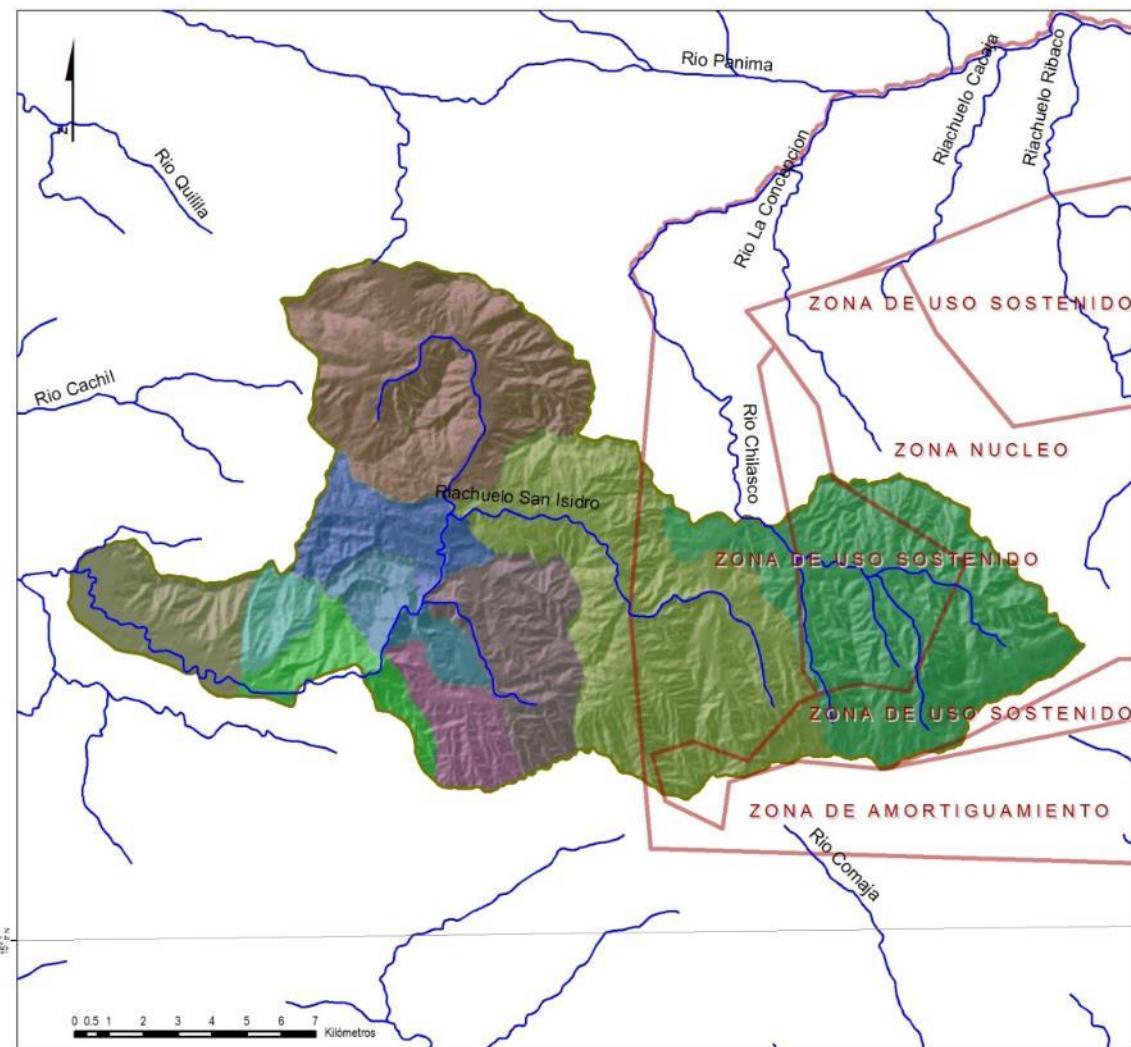


Figura 20. Ecosistemas hidrológicamente homogéneos sobreuestos en un mapa de hipsometría de la subcuenca San Jerónimo.

MAPA DE MICROCUENCIAS
Subcuenca Río San Jerónimo



Leyenda

Ríos	Las Flautas	San Jerónimo Bajo
Sierra de las Minas	Matanzas	Santa Barbara
Microcuencas	Matanzas-Sta Barbara	Tasquehuíte
Concepción-Sta Cruz	San Isidro	
El Hornito	San Jerónimo Alto	

Proyección del mapa digital: UTM, zona 15, DATUM WGS 84.
Proyección del mapa impreso: Coordenadas geográficas,
Esferoide de Clarke 1866.

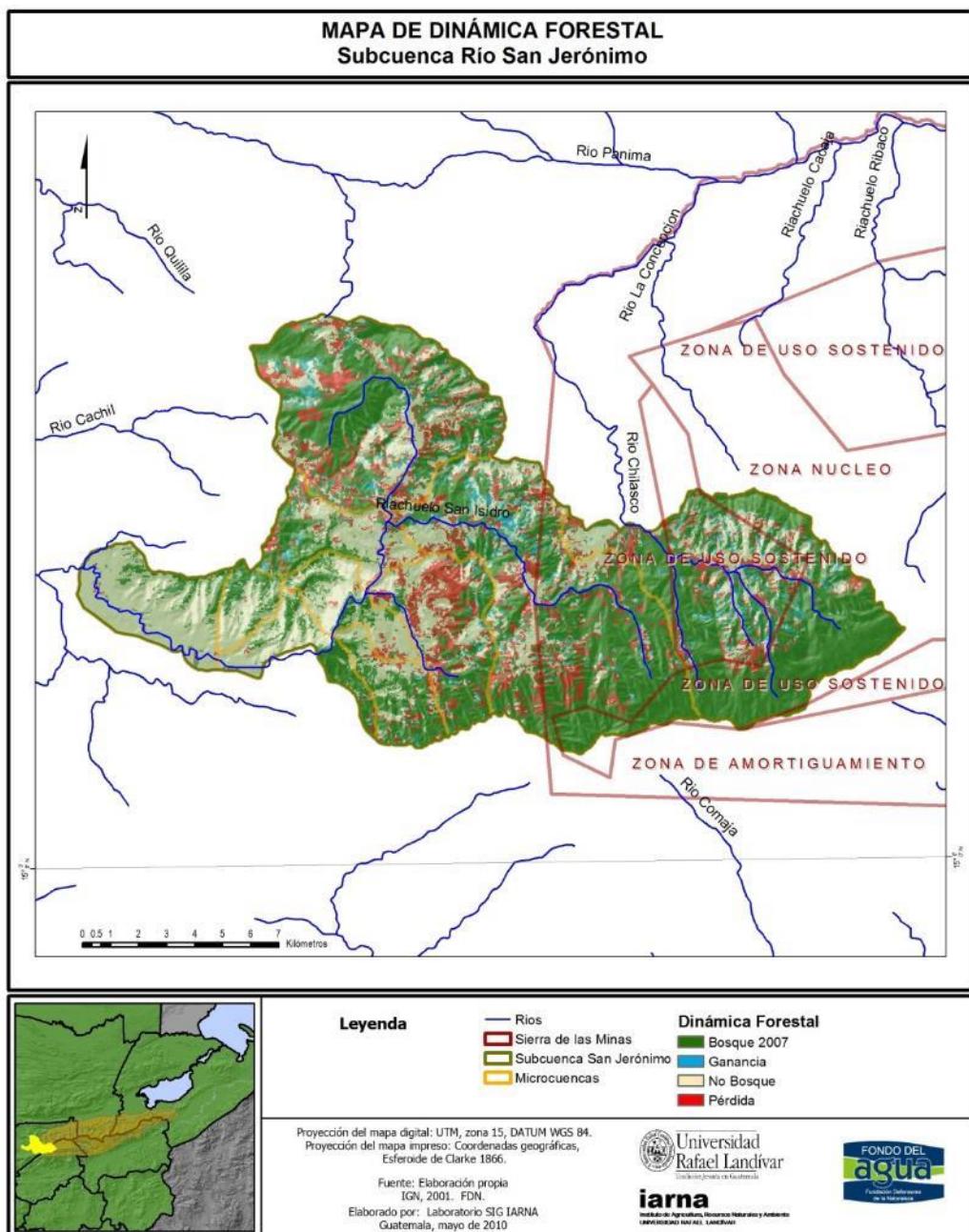
Fuente: Elaboración propia
IGN, 2001. FDN.
Elaborado por: Laboratorio SIG IARNA
Guatemala, mayo de 2010

**Universidad
Rafael Landívar**
Facultad Jesuita en Guatemala

iarna
Instituto de Agrobiología, Recursos Naturales y Ambiente
UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

**FONDO DEL
agua**
Fundación Defensores de la Naturaleza

Figura 21. Microcuencas de la subcuenca San Jerónimo.



Microcuenca	Bosque 2001	Bosque 2007	Pérdida	Ganancia	Pérdida Neta	Tasa anual de deforestación
	ha					
Concepcion-Sta Cruz	4,158	3,911	578	285	293	1.17
El Hornito	175	181	3	10	(7)	0.00
Las Flautas	3,078	2,434	905	238	667	3.61
Matanzas	568	461	155	45	109	3.21
Matanzas-Sta Barbara	270	227	48	3	45	2.80
San Isidro	4,335	3,651	1,015	323	692	2.66
San Jeronimo Alto	364	335	34	5	28	1.29
San Jeronimo Bajo	189	186	15	7	8	0.73
Santa Barbara	1,111	624	545	56	489	7.33
Tasquehuite	557	491	94	27	66	1.98
Total general	14,804	12,501	3,391	1,000	2,392	2.69

Figura 22. Dinámica forestal 2001-2007 subcuenca San Jerónimo

MAPA HIPSOMÉTRICO
Subcuenca Río Pueblo Viejo

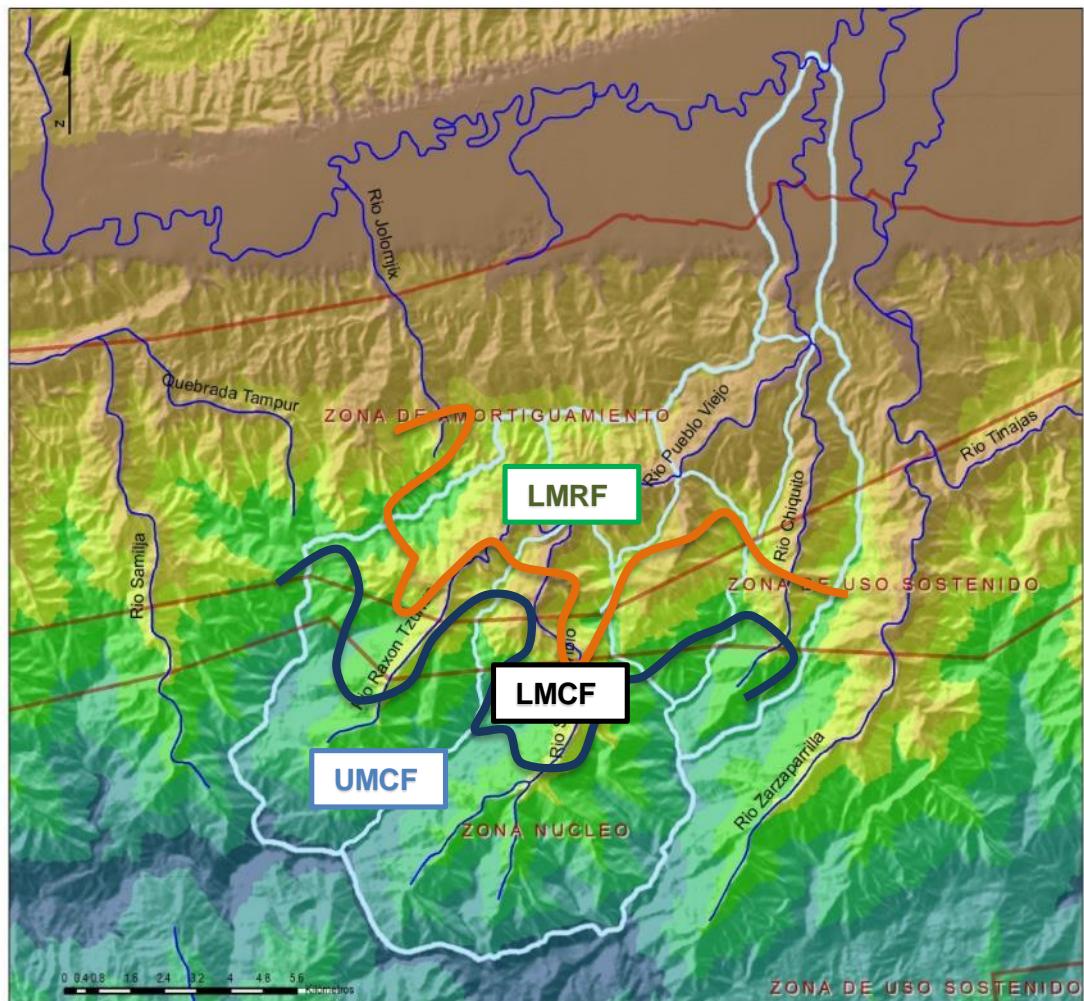


Figura 23. Ecosistemas hidrológicamente homogéneos sobreimpuestos en un mapa de hipsometría de la subcuenca Pueblo Viejo.

MAPA DE MICROCUENCIAS
Subcuenca Río Pueblo Viejo

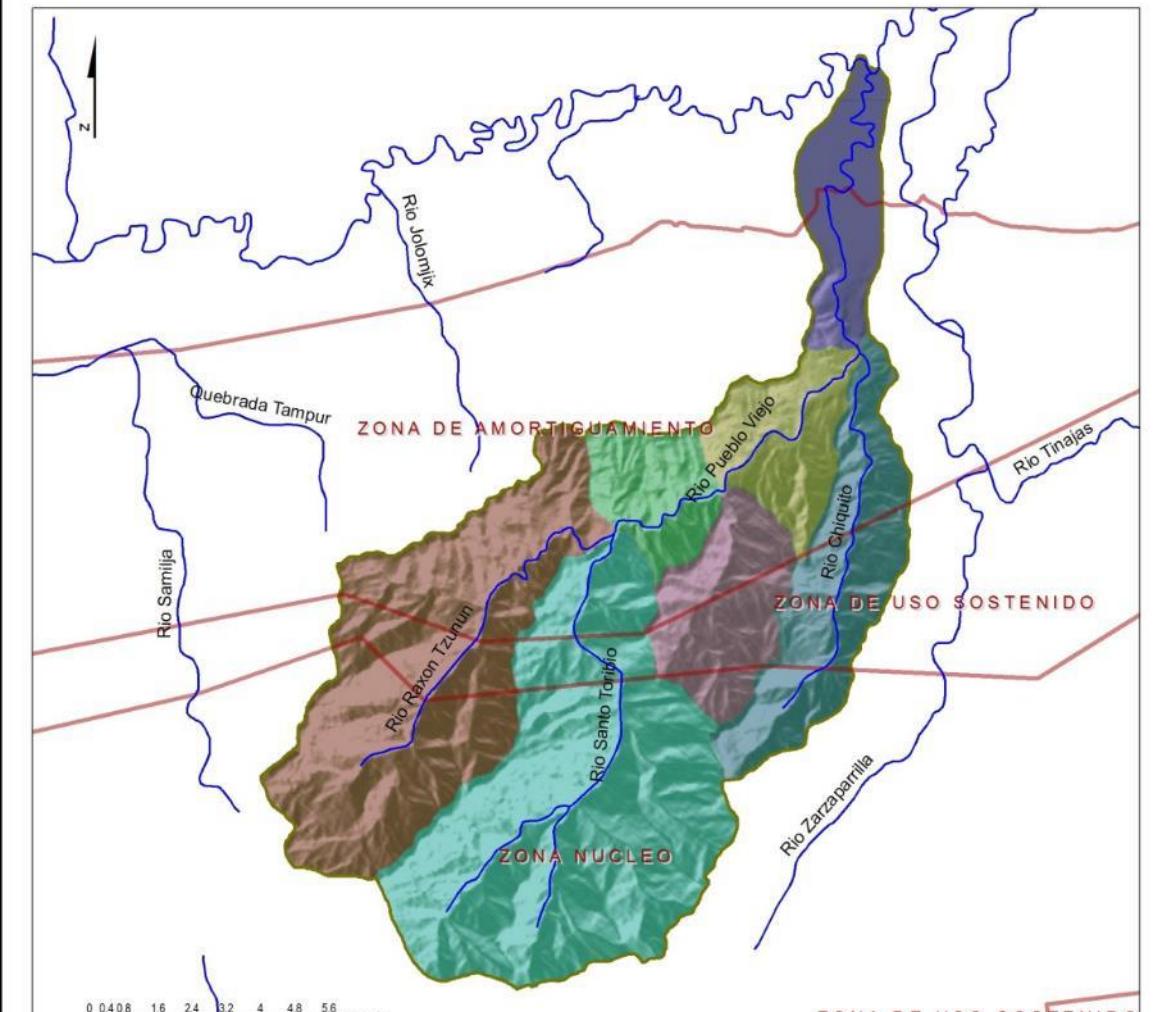
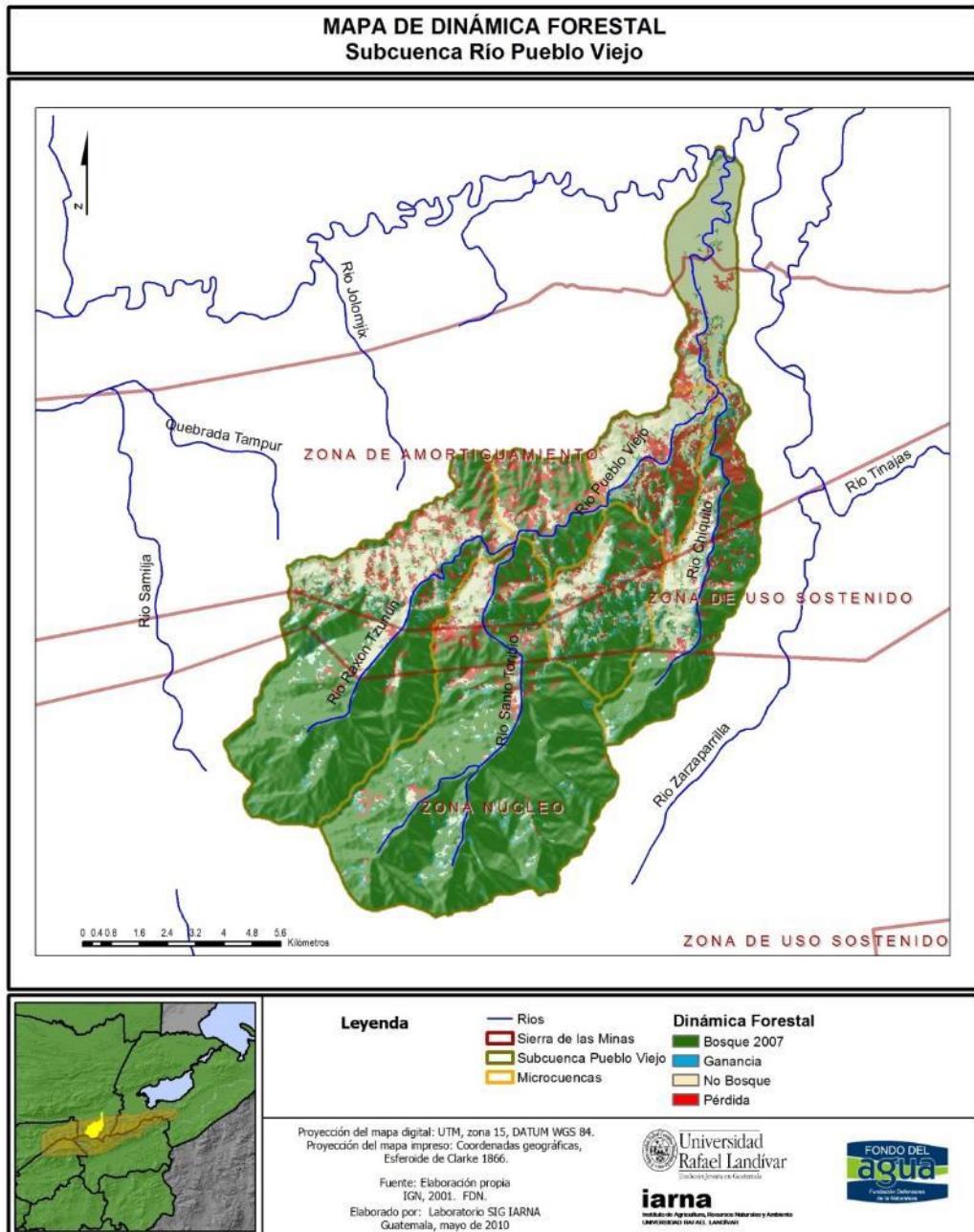


Figura 24. Microcuencas de subcuenca Pueblo Viejo



Microcuenca	Bosque 2001	Bosque 2007	Pérdida	Ganancia	Pérdida Neta	Tasa anual de deforestación %
	ha					
Chiquito	1,305	1,141	280	109	171	2.18
Pueblo Viejo	483	232	300	48	252	8.69
Pueblo Viejo alto	667	490	213	32	181	4.52
Pueblo Viejo bajo	147	52	116	14	102	11.56
Quebrada Cancon	785	767	142	111	30	0.64
Raxón Tzunún	3,028	2,876	359	126	233	1.28
Santo Toribio	4,591	4,482	288	174	114	0.41
Total general	11,006	10,039	1,698	615	1,083	1.64

Figura 25. Dinámica forestal subcuenca Pueblo Viejo

Posteriormente se presentan (Figura 25), la dinámica forestal de la cuenca distribuida por cada una de las microcuencas establecidas. En esta puede apreciar que la tasa de deforestación es positiva, es decir que existe una fuerte pérdida de la cobertura forestal y, consecuentemente, del suelo. El análisis de la dinámica forestal puede considerarse como un buen indicador del adecuado cumplimiento de los objetivos de conservación del área protegida, sin embargo puede notarse las malas condiciones alrededor de la misma. (Zalewski, 2000)

5. Bibliografía

- Bennett, M., Bouma, J., & Wolters, T. (2002). *Environmental management accounting: Informational and institutional developments*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic publisher.
- Boyd, J., & Banzhaf, S. (2007). What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 1-11.
- Brown, M., & De la Roca, I. (1996). *A valuation analysis of the role of cloud forest in watershed protection*. Guatemala: RARE.
- Bruijnzeel , L., & Proctor, W. (1995). Hydrology and Biochemistry of tropical montane cloud forest: what do we really know? En L. Hamilton, J. Juvick , & F. Hamilton, *Tropical montane cloud forest* (págs. 38-78). New York: Springer-Verlag.
- Bruijnzeel. (1990). *Hydrology of moist tropical forest effects of conversion. A State of knowledge review*. . Amsterdam: UNESCO, International Hydrological Programme.
- Bruijnzeel, L., Kappelle, M., Mulligan, M., & Scatena, F. (2010). Tropical montane cloud forests: state of knowledge and sustainability perspectives in a changing world. En L. Bruijnzeel, F. Scatena, & L. Hamilton, *Tropical Montane Cloud Forest. Science for conservation and management* (pág. 740). New York: Cambridge Press.
- Bruijnzeel, S. (1999). Hydrology of Tropical Montane Cloud Forest: a reassessment. En I. H. Programme, *Second International Colloquium on Hydrology and Water Management in the Humid Tropics* (pág. 27). Panama: UNESCO.
- Bruijnzeel, S. (2008). Demonstrating hydrological benefits from tropical reforestation efforts. (pág. 31). Amsterdam: Vrije Universitet.
- CEPAL. (2004). La distribución espacial de la pobreza en relación a los sistemas ambientales en América Latina. Serie *medio ambiente y desarrollo*. Santiago, Chile: CEPAL.
- Custodio, B., & LLamas, E. (2001). *Recarga Hídrica*. Madrid: Mundiprensa.
- Daubenmire, D. (1988). *Ecología Vegetal. Tratado de autoecología de plantas*. México, D.F.: Limusa.
- De la Cruz, R. (1972). *Mapa de zonas de vida de Guatemala*. Guatemala: INAFOR.
- Deepak, R. (2006). Dry season clouds and rainfall in northern Central America: Implication on mesoamerican biological corridor. *Global and planetary change*, 54 (2006) 150–162.
- Defensores de la Naturaleza. (2004). *Programa de investigación de recursos hídricos de la Reserva de la biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Defensores de la Naturaleza.

Dengo, G. (1968). *Estructura geológica, historia tectónica y morfología de America Central*. Guatemala : Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2013). *Documento exploratorio de la cuenca te ecosistemas*. Bogotá: Contraloría general de la República de Colombia.

Dinerstein, E. O. (1995). *A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin Amercia and the Caribbean*. Washington D.C.: The World Bank and WWF.

Dix, M. (1993). *Sierra de las Minas Biosphere Reserve* . Washington: Smithsonian Institute.

Dix, M. A. (1997). Centres of Plant Diversity: A Guide and Strategy for Their Conservation. Volume 3: The Americas. En S. H.-M.-L. Davis, *Centres of Plant Diversity: A Guide and Strategy for Their Conservation. Volume 3: The Americas*. Cambridge, England: IUCN Publication Unit.

Estrada. (1999). *Distribución altitudinal de las comunidades forestales en la parte media de la subcuenca Río Raxón Tzunum (1200-2200 msnm)*, Reserva de biosfera Sierra de las Minas. . Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.

European Comission, United Nations and World Bank. (2013). *System of environmental-economic accounting 2012. Experimental ecosystem accounting*. s.i.: United Nations.

FAO. (1992). *Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Guía FAO Conservación*. México: FAO.

FIPA/AID. (2002). *Estudio de valoración económica del servicio ambiental de regulación hídrica del lado sur de la Reserva de la Biósfera Sierra de las Minas*. Guatemala : FIPA/AID.

Foster, P. (2001). The potential negative impacts of global climate change on. *Earth sciences reviews*, 55 (2001) 73–106.

Frumau, K., Bruijnzeel, L., & Tobon, C. (2006). *Hydrological measurement protocol for montane cloud forest. Annex 2, Final Technical Report DFID-FRP Project R7991*. Amsterdam: Vrije Universiteit.

Fundación Defensores de la Naturaleza. (2003). *III Plan Maestro 2003-2008 de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Fundación Defensores de la Naturaleza.

Fundación Defensores de la Naturaleza. (2004). *Valoración de la producción agrícola bajo riego en la cuenca San Jerónimo*. Guatemala: FDN.

Fundación Defensores de la Naturaleza. (2010). *IV Actualización del Plan Maestro de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: FDN.

- García, G. (2007). *An ecohydrological and soils study in a montane cloud forest in the National Park of Garajonay, La Gomera (Canary Island, Spain)*. Amsterdam : Vrije Universiteit.
- Gonzales, O. (1999). *Estudio cualitativo de la composición forestal remanente entre 400 y 1200 msnm, de la subcuenca Río Raxón, Tzunum, Reserva de biosfera Sierra de las Minas, Panzos, Alta Verapaz*. Guatemala: universidad del Valle.
- Guatemala. (1960). *Mapa geológico de Guatemala*. Guatemala: Instituto Geográfico Nacional.
- Guerra, A. A. (2010). *Climate-related disaster risk in the mountain areas: the Guatemalan highlands at stat of the 21st century*. Oxford: university of Oxford.
- Haines-Young, R. (2000). Sustainable developement and sustainable landscapes: defnning a new paradigm for Landscapes Ecology. *Fennia*, 178(1) 4-7.
- Herrera, I. (1995). *Manual de Hidrología*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Holdridge, L. (1971). *Ecología basada en zonas de vida*. Turrialba: IICA.
- IARNA. (2009). *Cuentas Integrada de Tierras y Ecosistemas*. Guatemala: IARNA.
- IARNA/URL-IIA. (2006). *Análisis de coyuntura ambiental*. Guatemala, Guatemala: Instituto de Agricultural Recusross Naturales y Ambiente.
- IARNA/URL-IIA. (2006). *Perfil ambiental de Guatemala, tendencias y relexiones sobre la gestión ambiental*. Guatemala: IARNA.
- Janauer, G. (2000). Ecohydrology: fusing concepts and scales. *Ecological engineering*, 9-16.
- Kappelle, M., & Brown, A. (2000). *Bosques nublados del neotrópico*. San José, Costa Rica: INBIO.
- Kimaro, D., Poesen, J., Msanya, B., & Deckers, J. (2008). Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interril and Ril erosion. *Catena*, 75 38–44.
- Linsley, J. (1998). *Hidrología para ingenieros*. Distrito federal, Mexico: McGaraw-Hill.
- Linsley, R. J. (1988). *Hidrología para ingenieros*. México: Mc Graw Hill.
- Loening, L., & Markussen, M. (2003). *Pobreza, Deforestación y Pérdida de la biodiversidad en Guatemala*. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen.
- Machorro, S. (2010). *Estudio hidrogeológico de las cuencas Pasabien y Pueblo Viejo*. Guatemala : World Wildlife Fund.
- MAGA. (2002). *Mapa de erosión potencial de Guatemala*. Guatemala: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación .

- Marcos, C. (1999). *Censo de Especies del género Quercus y su distribución geográfica en dos cuencas de la reserva de la biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Universidad del Valle.
- Martin, E. M. (2003). *Local Knowledge of Biodiversity and Water Conservation within Multi-Strata Coffee Agroforestry Systems, River Hato Watershed, El Progreso Department, Guatemala*. University of Wales, Forestry . Wales: Forestry of University of Wales.
- Martinez, N. y. (1998). *Hidrología Forestal*. Valladaolid: Universidad de Valladolid.
- Mathewson, K. (2004). A century and counting: Geographical research on Guatemala a historical perspective. (L. S. Department of Geography and Anthropology, Ed.) *Geoforum*.
- Matucci , S., & Colma , S. (1982). *Estudio de la vegetación* . Mexico : OEA.
- Medinilla, O. E. (1999). *Estudio florístico de la comunidad de pino encino de la cuenca Río Colorado, Zacapa*. . Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Mendez, C., & Coronado, E. (1993). *Evaluación Ecológica Rápida de la Reserva de la Biósfera "Sierra de las Minas"*. . Guatemala: Centro de Estudios Conservacionistas de la Universidad de San Carlos de Guatemala (CECON).
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. (2003). *Mapa de clasificación taxonómica de suelos*. Guatemala: MAGA.
- Monslave, G. (2008). *hidrología en la ingeniería*. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.
- Naciones Unidas. (2013). *Sistema de contabilidad ambiental y económica para el agua*. New York: Naciones Unidas.
- Nuñez, O. (2005). *Fondo del agua Sistema Motagua-Polochic*. Guatemala: Defensores de la naturaleza.
- OMM, Organización meteorológica Mundial . (1994). *Guía de prácticas hidrológicas*. Washington: Organización Meteorológica Mundial.
- Postel, S., & Thomphson, B. (2005). Watershed protection: Capturing the benefits of nature's water supply services. *Ecological Forum*, 95-108.
- Potschin, M. H.-Y. (2005). Rio +10 sustainability science and Landscapes Ecology. *Landscape and urban planning*, 162-174.
- Rachchh, M., & Siddheshwar, G. (2014). The frameworks of environmental accounting. *International Journal of Engineering and Management Sciences* , 160-162.
- Rosito, J. C. (1999). *Estudio florístico, edáfico y geológico de la comunidad del cipresillo (Taxus globosa Schlecht.) en los cerros Pinalón, Guaxabajá y Mulujá de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Rosito, J. C. (2010). *Monitoreo hidrológico en la subcuenca Tecolután / proyecto PESH*. Guatemala: WWF-CARE/IARNA.
- Sandoval, I. (1989). *Principios de riego y drenaje*. Guatemala: Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Standley, P., & Steyermark, J. (1964). *flora of Guatemala*. Chicago: Natural museum Fieldiana Botany .
- Succhini, A. (2002). *Endemismo florístico en el norte de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Centro de Estudios Conservacionistas de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Thornthwaite, C. (1931). The climate of North America, according with a new classification. *Geographical Review*, 633-655.
- Tobón, C. (2009). *Protocolo de mediciones hidrologicas, de erosión y biológicas en la cuenca del río Jequetepeque, Perú*. Bogotá: Universidad nacional de Colombia.
- Toledo, E. (1997). *Fitodistribución de epífitas del género Tillandsia L. (Bromeliaceae: Tillandsioideae) en la Cuenca del Río Jones, Sierra de las Minas*. Guatemala: Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- United Nations. (2003). *Integrated Environmental and Economic Accounting, 2003*. New York: United Nations.
- United Nations. (2004). *Millennium Ecosystem Assessment*. Unaited Nations.
- Van Dijk, A. (2003). *Ecohydrology. Course Reader*. Amsterdam: Vrije Universitet.
- Vargas, J. M. (2001). *Caracterización de la comunidad de helechos arborecentes en la cuenca del río Naranjo*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.
- Veliz, M. E., Cobar, A. J., Ramírez, F. J., & García, M. J. (2003). *La diversidad florística del Monte Espinoso de Guatemala* . Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, DIGI, Proyecto DIGUSAC 2.55 58 p.
- Vora, R. (1994). *Recommendations on management of Sierra de las Minas Biosphere reserve, Guatemala*. Guatemala: Defensores de la Naturaleza.
- Weber, J.-L. (2007). Implementation of land and ecosystem accounts at the European Environment Agency. *Ecological Economics*, 696-707.
- WWF. (2007). *Criterios para la prirización y selección de cuencas. Guatemala*. Guatemala : World Wildlife Fund Inc.
- Zalewski, M. (2000). Ecohydrology — the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecological Engineering*(16), 1-8.

6. Anexos

Anexo 1. Clasificación climática de Thornthwaite.

Consideraciones generales

La propuesta de Thornthwaite consiste en comparar los aportes de agua con las pérdidas que, bajo un clima dado, las cuales resultan de los fenómenos de evaporación y transpiración. Para tal fin se parte del concepto de **evapotranspiración**, que se define como la cantidad de agua perdida tanto por la evaporación desde la superficie del suelo o las napas líquidas subyacentes como por la transpiración vegetal una magnitud que no es una propiedad característica de la atmósfera en las cercanías del suelo, puesto que los valores que pueda tomar estarán limitados cada vez que la disminución de humedad en el suelo reduzca la cantidad de agua evaporable.

Thornthwaite introduce el concepto de **evapotranspiración potencial**, y la define como la evapotranspiración efectuada si el agua evaporable fuera renovada constantemente en su origen, sea éste edáfico o biótico. Se calcula o se estima a partir de datos climatológicos simples, mediante métodos cada vez más perfeccionados. Es de señalar que la evapotranspiración potencial constituye una **variable climatológica**, independiente del suelo y de la vegetación, y dependiendo únicamente de las condiciones atmosféricas. De ahí que muchas veces se asimila el término evapotranspiración potencial a **demandas atmosférica**.

La clave del sistema está constituida por el cálculo de dos índices que expresan, para el conjunto del año medio, el grado de sequía y el grado de humedad de una región. Se definen los déficits anuales y los excedentes anuales de agua comparando, por un lado, la evapotranspiración "real" (ETR) con la evapotranspiración potencial (n o ETP), y por el otro las precipitaciones con la evapotranspiración "real".

Esta última se calcula teniendo en cuenta las cantidades de agua que el suelo puede brindarle a la vegetación cuando sus necesidades de agua (mensuales) se hacen superiores a los aportes por precipitación.

Variables e índices básicos.

Llamando:

n (water need): a las necesidades de agua anuales (de la vegetación), expresadas por el valor de la evapotranspiración potencial (ETP),

e.r.: a la evapotranspiración real (ETR), calculada según el método de balance hídrico de Thornthwaite

d: al total anual de los déficits de agua mensuales de agua

s: al total anual de los excedentes mensuales

p: al total anual de las precipitaciones,
se tienen para todo el año medio, las siguientes relaciones simples:

$$d = n - e.r.$$

$$s = p - e.r.$$

Los primeros índices a calcular son:

$$\text{Indice de humedad } I_h = 100 * s / n$$

$$\text{Indice de aridez } I_a = 100 * d / n$$

Los cuatro criterios de la clasificación de Thornthwaite

Criterio 1. El primer símbolo proviene de un Indice Global de Humedad (I_m = moisture index) que resulta de una combinación entre I_h e I_a .

El índice o razón de aridez posee un límite superior que se alcanza cuando **e.r.** es nula, lo cual sólo se presenta en las regiones donde no ocurre ninguna precipitación en el año.

En estos casos la “deficiencia” de agua es exactamente igual a las “necesidades” y la razón de aridez (que es siempre positiva), llega al máximo de 100%

Pero tal límite teórico no existe en el sentido contrario, donde la precipitación y la evapotranspiración real quedan independientes entre sí, por lo que la razón de humedad I_h excede el 100% en las regiones donde la precipitación sobrepasan a la evapotranspiración real en una cantidad superior a las “necesidades” determinadas por la demanda atmosférica (ETP).

Teniendo en cuenta que el excedente y el déficit hídrico se presentan generalmente en estaciones diferentes, se puede tener una mejor apreciación global incorporando el Indice Global de Humedad a las dos razones I_h e I_a con signos opuestos. Y aunque un excedente de agua no puede siempre compensar una insuficiencia posterior, hay una cierta tendencia a la regulación, por la existencia de ciertas reservas (humedad del subsuelo, eventuales napas freáticas, etc.) más profundas que las que se consideran en balances hídricos simplificados como el del propio Thornthwaite. Estas reservas reducen en parte los efectos de sequía, sobre todo si la vegetación contiene plantas perennes vivaces con raíces profundas.

En este caso la transpiración continúa, pero a un ritmo más lento. Thornthwaite formula entonces la hipótesis de trabajo siguiente: cada excedente de 6 mm de agua en cierta estación podía ser suficiente para inhibir la falta de agua en la estación siguiente hasta un total del 10 mm.

En base a esta hipótesis se le da más peso a la razón de humedad que al cociente de aridez la, afectando a este último con un coeficiente de 6 décimos (6/10). De tal manera en Indice Global de Humedad:

$$I_m = I_h - 0.6 * I_a$$

o escrito de otro modo:

$$I_m = 100*s - 60*d$$

n

Tomando la escala de valores con intervalos de 20 en 20% del I_m , se clasifican nueve tipos climáticos, desde tipo **Arido (-60 < I_m < -40)** al tipo **Perhúmedo (I_h 100)**.

Estos tipos climáticos están designados por una letra mayúscula, la primera de las cuatro que caracterizan los esquemas de Thornthwaite.

TABLA I

Tipo climático	Letra	Indice Global
Perhúmedo	A	$I_m > 100$
Húmedo	B_4	$100 > I_m > 80$
	B_3	$80 > I_m > 60$
	B_2	$60 > I_m > 40$
	B_1	$40 > I_m > 20$
Sub-húmedo a húmedo	C_2	$20 > I_m > 0$
Seco a sub-húmedo	C_1	$0 > I_m > -20$
Semiárido	D	$-20 > I_m > -40$
Arido	E	$-40 > I_m > -60$

Criterio 2. La segunda letra se destina a resaltar el rasgo dominante de la Variación estacional de la humedad efectiva.

Para ello se determinan diez clases: cinco para los climas húmedos ($I_m > 0$), donde se considera el valor de I_a concomitantemente con la importancia del déficit, y eventualmente, la estación en la cual se presenta, y cinco para los climas secos ($I_m < 0$), considerando esta vez el valor de I_h , la importancia del excedente y la estación en la cual aparece.

TABLA II. Variación estacional de la humedad efectiva

Símbolo	Significado		
r	Sólo climas húmedos (A, B, C_2)	$I_a < 16.7$	Poco o ningún déficit en cualquier estación
d	Sólo climas secos (C ₁ , D, E)	$I_h < 10$	Poco o ningún excedente en cualquier estación.
s	Variación estacional de humedad de carácter moderado, siendo el verano la estación más seca. En climas húmedos (A, B, C_2)	$16.7 < I_a < 33.3$	Déficit estival moderado.
	. En climas secos (C, D, E)	$10.0 < I_h < 20.0$	Excedente invernal moderado
w	Variación estacional de humedad de carácter moderado, siendo el invierno la estación más seca. En climas húmedos (A, B, C_2)	$16.7 < I_a < 33.3$	Déficit invernal moderado.
	. En climas secos (C, D, E)	$10.0 < I_h < 20.0$	Excedente estival moderado.
s_2	Fuerte variación estacional de humedad, siendo el verano la estación más seca. En climas húmedos	$I_a > 33.3$	Gran déficit estival.
	. En climas secos	$I_h > 20.0$	Gran déficit invernal.
w_2	Fuerte variación estacional de humedad, siendo el invierno la estación más seca. En climas húmedos	$I_a > 33.3$	Gran déficit invernal.
	. En climas secos	$I_h > 20.0$	Gran déficit estival.

Criterio 3. El tercer símbolo expresa el Indice de eficacia térmica, y aparece en segunda posición en la fórmula.

Se establece directamente de los valores de la evapotranspiración potencial, expresados en milímetros de la capa de agua equivalente, clasificando las regiones del planeta en nueve grupos, del “clima de hielo” ($n > 142 \text{ mm}$) a tipo megatermal ($n > 1140 \text{ mm}$).

TABLA III. Eficacia térmica media anual

Indice de eficacia térmica = ETP en mm.	Símbolo	Tipo de clima
$n > 1140$	A'	Megatermal
$1140 > n > 997$	B ₄ '	Cuarto mesotermal
$997 > n > 855$	B ₃ '	Tercer mesotermal
$855 > n > 712$	B ₂ '	Segundo mesotermal
$712 > n > 570$	B ₁ '	Primer mesotermal
$570 > n > 427$	C ₂ '	Segundo microtermal
$427 > n > 285$	C ₁ '	Primer microtermal
$285 > n > 142$	D'	Clima de tundra
$142 > n$	E'	Clima de hielo

Criterio 4. El cuarto símbolo traduce la concentración estival de la eficacia térmica. Para ello se toma el cociente entre la evapotranspiración potencial de los 3 meses de verano sobre la de todo el año, en porcentaje, obteniéndose 8 clases según la tabla siguiente:

TABLA IV. Concentración estival de la eficacia térmica

(ETP de los 3 meses de verano / ETP anual) * 100	Símbolo de Thornthwaite
Valores inferiores a 48.0	a'
Entre 48.0 y 51.9	b ₄ '
Entre 51.9 y 56.3	b ₃ '
Entre 56.3 y 61.6	b ₂ '
Entre 61.6 y 68.0	b ₁ '
Entre 68.0 y 76.3	c ₂ '
Entre 76.3 y 88.0	c ₁ '
Valores superiores a 88.0	d'

Los caracteres del clima de un lugar se expresan en definitiva por la sucesión de cuatro letras indexadas que indican en su orden: el grupo climático según el índice global de humedad, el tipo de eficacia térmica media anual según el valor anual de la ETP tomada directamente como elemento climático, el tipo de variación estacional de la humedad efectiva, utilizando las razones de aridez o de humedad según el caso, y el grupo de la concentración estival de la eficacia térmica.

Anexo 2. Listado de especies de plantas en la RBSM.

Cuadro 6. Listado de especies reportadas como endémicas para la Sierra de las Minas y Guatemala o solo conocidas en la RBSM. Fuente: Elaboración propia, basado en estudios científicos de inventarios botánicos.

No.	Especie	Familia	Distribución restringida	Colectada nuevamente	Otros
1	<i>Acer Skutchii</i> Rehder	Aceraceae	Endemica de Guatemala	Medinilla, 1999	600-2,600 meters; endemic
2	<i>Agave pachycentra</i> Trel.	Agavaceae	Endemica de Guatemala	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
3	<i>Ilex quercetorum</i> I. M. Johnston	Aquifoliaceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist, mixed or oak forest, 1,500-2,000 meters; endemic
4	<i>Ilex gracilipes</i> I.M. Johnston	Aquifoliaceae	Endemica de Guatemala	Rosito, 1999; González, 2001; Vargas, 1999.	bosque muy húmedo montano bajo y montano
5	<i>Anthurium subcordatum</i> Schott	Araceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist or wet forest, 1100-2500 meters; endemic
6	<i>Oreopanax steyermarkii</i> A. C. Smith.	Araliaceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist or wet forest; 1,400-2,500 meters; endemic
7	<i>Geonoma Seleri</i> Burret	Arecaceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist or wet, mixed, mountain forest, 1300-2300 meters, or sometimes lower; endemic
8	<i>Chamaedorea digitata</i> Standl. & Steyerl.	Arecaceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist or wet, mixed, mountain forest, 1400-2600 meters; endemic
9	<i>Chamaedorea lehmannii</i> Burret	Arecaceae	Endemica de Guatemala	NA	Dense, moist or wet, mountain forest, 1400-2600 meters; endemic
10	<i>Eupatorium hypodictyon</i> Rob.	Asteraceae	Endemica de Guatemala	NA	At 900-2,100 m. or perhaps even higher; endemic
11	<i>Eupatorium montigenum</i> Standl. & Steyerl.	Asteraceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist mountain forest, 2,000-3,000 m.; endemic
12	<i>Eupatorium ovillum</i> Standl. & Steyerl.	Asteraceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist or wet thickets or mixed forest, 2,400-3,200 m.; endemic
13	<i>Mahonia Johnstonii</i> Standl. & Steyerl.	Berberidaceae	Endemica de Guatemala	NA	Dry, brushy, often rocky hillsides, 1,300-1,650 meters; endemic
14	<i>Tillandsia xerographica</i> Rohw.	Bromeliaceae	Endemica de Guatemala	Véliz et. Al. 2003; Toledo, 1997.	Monte espinoso
15	<i>Tillandsia ponderosa</i> L. B. Smith	Bromelliaceae	Endemica de Guatemala	Toledo, 1997.	Epiphytic in cloud forests, 2000-2900 meters; endemic
16	<i>Marshallocereus eichlamii</i> (Britt. & Rose)Arias	Cactaceae	Endemica de Guatemala	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
17	<i>Nopalea lutea</i> Rose	Cactaceae	Endemica de Guatemala	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
18	<i>Microtropis ilicina</i> Standl. & Steyerl.	Celastraceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist or wet, mixed mountain forest, 1,600-2,800 meters; endemic
19	<i>Euonymus enantiophylla</i> (Donn.Smith) Lundell	Celastraceae	Endemica de Guatemala	Rosito, 1999; González, 2001; Vargas, 1999.	bosque muy húmedo montano bajo y montano
20	<i>Microtropis ilicina</i> Standl. & Steyerl.	Celastraceae	Endemica de Guatemala	Rosito, 1999; González, 2001; Vargas, 1999.	bosque muy húmedo montano bajo y montano
21	<i>Microtropis guatemalensis</i> Sprague	Celastraceae	Endemica de Guatemala	Rosito, 1999; González, 2001; Vargas, 1999.	bosque muy húmedo montano bajo y montano

22	<i>Tradescantia Standleyi</i> Steyermark in Standl. & Steyerm.	Commelinaceae	Endemica de Guatemala	CECON, 2002	Moist or wet forest, often on exposed rocks, 1,000-2,100 meters; endemic
23	<i>Weinmannia Tuerckheimii</i> Engler.	Cunoniaceae	Endemica de Guatemala	NA	Wet mixed forest, 1,450-3,000 meters; endemic
24	<i>Weinmannia tuerckheimii</i> Engler	Cunoniaceae	Endemica de Guatemala	Rosito, 1999; González, 2001 Vargas, 1999.	bosque muy húmedo montano bajo y montano
25	<i>Alsophila salvini</i> Hook	Cyatheaceae	Endemica de Guatemala	Rosito, 1999; González, 2001 Vargas, 1999.	bosque muy húmedo montano bajo y montano
26	<i>Cavendishia guatemalensis</i> Loes.	Ericaceae	Endemica de Guatemala	Rosito, 1999; González, 001; Vargas, 1999.	bosque muy húmedo montano bajo y montano
27	<i>Galactia discolor</i> Donn. Smith.	Fabaceae	Endemica de Guatemala	NA	Exposed rocky mountain slopes, often in pine-oak forest, 1,200-2,200 meters; endemic
28	<i>Lonchocarpus minimiflorus</i> Donn. Sm.	Fabaceae	Endemica de Guatemala	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
29	<i>Quercus flagellifera</i> Trelease.	Fagaceae	Endemica de Guatemala	Marcos, 1999.	Moist or wet, usually mixed, mountain forest, 1,250-2,500 meters; endemic.
30	<i>Quercus pacayana</i> Muller.	Fagaceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist or wet, mixed, mountain forest, 1,800- 2,600 meters; endemic.
31	<i>Phoebe salvini</i> (Mez.) Lundell.	Lauraceae	Endemica de Guatemala	Rosito, 1999; González, 001; Vargas, 1999.	bosque muy húmedo montano bajo y montano
32	<i>Beaucarnea guatemalensis</i> Rose.	Liliaceae	Endemica de Guatemala	NA	On dry rocky hillsides, 700-1,600 meters endemic.
33	<i>Struthanthus oliganthus</i> Standl. et Steyerm.	Loranthaceae	Endemica de Guatemala	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
34	<i>Mascagnia excelsa</i> Standl. & Steyerm.	Malpighiaceae	Endemica de Guatemala	CECON, 2002	Bosque muy húmedo subtropical cálido, Pazós, Alta Verapaz
35	<i>Dorstenia Contrajerva</i> var. <i>tenuiloba</i> (Blake) Standl. & Steyerm.	Moraceae	Endemica de Guatemala	NA	600-1,000 meters.
36	<i>Epidendrum</i> <i>Schweinfurthianum</i> Correll,	Orchidaceae	Endemica de Guatemala	NA	2,100-2,400 meters. Apparently endemic to Guatemala.
37	<i>Epidendrum sobralioides</i> Ames & Correll.	Orchidaceae	Endemica de Guatemala	NA	2,000-2,600 meters. Apparently endemic to Guatemala.
38	<i>Goodyera major</i> Ames & Correll.	Orchidaceae	Endemica de Guatemala	NA	2,500 meters. Apparently endemic to Guatemala.
39	<i>Piper brujoense</i> Trelease & Standley.	Piperaceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist or wet, mixed, mountain forest, 1,700- 2,500 meters; endemic
40	<i>Peperomia condormiens</i> Trelease in Yuncker.	Piperaceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist or wet forest, sometimes in forest of pine and Liquidambar, 1,500-2,400 meters, usually epiphytic; endemic.
41	<i>Peperomia hondoana</i> Trelease & Standley.	Piperaceae	Endemica de Guatemala	NA	On shaded rocks or rather dry bluffs, 400- 1,800 meters; endemic.
42	<i>Peperomia limana</i> Trelease & Standley.	Piperaceae	Endemica de Guatemala	CECON, 2002	Terrestrial or epiphytic in moist or wet, mixed or pine, mountain forest, 1,800-2,800 meters; endemic.
43	<i>Peperomia tacticana</i> Trelease & Standley.	Piperaceae	Endemica de Guatemala	NA	Terrestrial or epiphytic in moist or wet, mixed, mountain forest, 1,500-2,300 meters; endemic.
44	<i>Piper tecutlanum</i> Trelease & Standley.	Piperaceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist or wet, mixed, mountain forest, sometimes on white-sand slopes, 1,500- 2,500 meters; endemic.
45	<i>Peperomia cobana</i> C. DC. Y Donn Smith.	Piperaceae	Endemica de Guatemala	CECON, 2002	Bosque muy húmedo subtropical cálido, Pazós, Alta Verapaz
46	<i>Peperomia frigidula</i> Trelease & Standl.	Piperaceae	Endemica de Guatemala	CECON, 2002	Bosque muy húmedo subtropical cálido, Pazós, Alta Verapaz

47	<i>Peperomia peltata</i> C. DC.	Piperaceae	Endemica de Guatemala	CECON, 2002	Bosque muy húmedo subtropical cálido, Pazós, Alta Verapaz
48	<i>Peperomia tuerckheimii</i> C. DC.	Piperaceae	Endemica de Guatemala	CECON, 2002	Bosque muy húmedo subtropical cálido, Pazós, Alta Verapaz
49	<i>Guamatela Tuerckheimii</i> Donn. Smith.	Rosaceae	Endemica de Guatemala	NA	Moist or wet, mixed, mountain forest, 1,750-2,400 meters, endemic.
50	<i>Prunus barbata</i> Koehne.	Rosaceae	Endemica de Guatemala	Rosito, 1999; González, 2001 Vargas, 1999.	1,300 meters-2,500 meters; endemic.
51	<i>Prunus rhamnoides</i> Koehne	Rosaceae	Endemica de Guatemala	Rosito, 1999; González, 2001 Vargas, 1999.	bosque muy húmedo montano bajo y montano
52	<i>Psychotria pachecoana</i> Standl. & Steyermark.	Rubiaceae	Endemica de Guatemala	NA	Damp mixed forest or wet thickets, 1,400-2,500 m.; endemic.
53	<i>Psychotria orogenes</i> L. Wms.	Rubiaceae	Endemica de Guatemala	CECON, 2002	Bosque muy húmedo subtropical cálido, Pazós, Alta Verapaz
54	<i>Uroskinnera spectabilis</i> Lindl.	Scrophulariaceae	Endemica de Guatemala	CECON, 2002	Bosque muy húmedo subtropical cálido, Pazós, Alta Verapaz
55	<i>Symplocos hartwegii</i> A.DC.	Symplocaceae	Endemica de Guatemala	Rosito, 1999; González, 2001 Vargas, 1999.	bosque muy húmedo montano bajo y montano
56	<i>Pilea ecbolophylla</i> Donn. Sm.	Urticaceae	Endemica de Guatemala	CECON, 2002	Bosque muy húmedo subtropical cálido, Pazós, Alta Verapaz
57	<i>Henrya guatemalensis</i> (Robins. & Bartl.) Happ.	Acanthaceae	Localidad tipo	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
58	<i>Dicliptera guttata</i> Standl. & Leonard	Acanthaceae	Localidad tipo	NA	Sierra de las Minas, along Rillito del Volcan de Monos, Volcan de Monos, 1,150-2,100 m.
59	<i>Verbesina minarum</i> Standl. & Steyermark.	Asteraceae	Localidad tipo	NA	Damp mountain forest, 2,000-3,000 m.; El Progreso; Zacapa (type from Rio Repollal, upper slopes to summit of mountain, Sierra de las Minas, Steyermark 42489). Mexico (Chiapas).
60	<i>Hieracium gronovii</i> L.	Asteraceae	Localidad tipo	NA	(Type from Sierra de las Minas, Zacapa, Steyermark 29722).
61	<i>Verbesina eperetma</i> Blake.	Asteraceae	Localidad tipo	NA	Known only from the type collection, Sierra de Las Minas, trail between Santa Rosalia de Marmol and Vegas, Zacapa.
62	<i>Mikania concinna</i> Standl. & Steyermark.	Asteraceae	Localidad tipo	NA	Known only from the type, Zacapa, Sierra de las Minas, climbing over mossy banks, middle and upper, southern slopes of volcan Gemelos, about 3,000 m.
63	<i>Buddleia euryphylla</i> Standl. & Steyermark.	Buddleiaceae	Localidad tipo	Méndez, 1993	Forested ravines or hillsides, 2,000-3,000 m.; known only from the type locality, Sierra de las Minas, on Montana Piamonte, El Progreso.
64	<i>Tripogandra disgrega</i> f. <i>glandulosa</i> Standl. & Steyermark.	Commelinaceae	Localidad tipo	NA	Moist or wet thickets or forest, 1,000-1,800 meters; known only from Guatemala; Zacapa (type from Sierra de las Minas, along trail between Rio Hondo and summit of mountain at Finca Alejandria).
65	<i>Befaria guatemalensis</i> Camp	Ericaceae	Localidad tipo	NA	Pine forest, 1,000-2,400 meters; Zacapa (type from Sierra de las Minas. Mexico; Hon.
66	<i>Phyllanthus minarum</i> Standl. & Steyermark.	Euphorbiaceae	Localidad tipo	NA	Known only from the type, El Progreso, Sierra de las Minas, hills between Finca Piamonte and slopes southeast of the finca, 2,400-2,500 meters.
67	<i>Euphorbia pantomalaca</i> Standl. & Steyermark.	Euphorbiaceae	Localidad tipo	NA	Known only from the type, Dept. Baja Verapaz, Sierra de las Minas, opposite El Rancho (Dept. El Progreso).
68	<i>Tapirira macrophylla</i> Lundell	Euphorbiaceae	Localidad tipo	NA	Moist mixed forest, sometimes along streams, 1,200 meters or less; Zacapa (Volcan de Monos, Sierra de las Minas. Type from mountain pine ridge, San Agustin, British Honduras.

69	<i>Persea sessilis</i> Standl. & Steyermark.	Lauraceae	Localidad tipo	Méndez, 1993	Moist mixed mountain forest, 2,100-2,400 meters; known only from the type, Zacapa, Sierra de las Minas, along Rio Repollal to summit of mountain.
70	<i>Agave minarum</i> Trelease	Liliaceae	Localidad tipo	NA	El Rancho, the type from Sierra de las Minas, 600 meters; Zacapa; at about 200 meters; perhaps also at Jutiapa, 900 meters, in dry thickets.
71	<i>Phoradendron Treleaseanum</i> Standl. & Steyermark.	Loranthaceae	Localidad tipo	NA	Known only from the type, Dept. Baja Verapaz, Sierra de las Minas opposite El Rancho (El Progreso), 700 meters.
72	<i>Cuphea arista</i> Hemsl.	Lythraceae	Localidad tipo	NA	Type from the Motagua Valley, Salvin & Godman, probably from Sierra de las Minas. British Honduras.
73	<i>Oxalis minarum</i> Standl. & Steyermark.	Oxalidaceae	Localidad tipo	NA	Known only from the type, Zacapa, Rio Hondo and summit of mountain at Finca Alejandria, 1,000-1,500 meters.
74	<i>Peperomia minarum</i> Standl. & Steyermark.	Piperaceae	Localidad tipo	NA	Known only from the type, El Progreso, Sierra de las Minas, along trail between Finca Piamonte and Cimiento.
75	<i>Piper zacapanum</i> Trelease & Standley.	Piperaceae	Localidad tipo	NA	Known only from the type, Zacapa, cloud forest in ravine bordering Quebrada Alejandria, summit of Sierra de las Minas, 2,500 meters.
76	<i>Piper planadosense</i> Trelease & Standley.	Piperaceae	Localidad tipo	NA	Known only from the type, Zacapa, Sierra de las Minas, cloud forest on summit, vicinity of Finca Planados, 2,500 meters.
77	<i>Piper minarum</i> Standl. & Steyermark.	Piperaceae	Localidad tipo	NA	Known only from the type, Zacapa, Sierra de las Minas, slopes of Monte Virgen, 2,200-2,400 meters.
78	<i>Lasiacis linearis</i> Swallen.	Poaceae	Localidad tipo	NA	Pine-covered canyon bordering Rio Lima, Sierra de las Minas, below Finca Alejandría, Dept. Zacapa, 2,000 meters. Known only from the type.
79	<i>Hoffmannia tuerckheimii</i> Donn.-Sm.	Rubiaceae	Localidad tipo	NA	Type from Sierra de las Minas, El Progreso, Montana Canahui, between Finca San Miguel and summit of ountain, 1,600-2,300 m.
80	<i>Hoffmannia sessilifolia</i> L. Wms.	Rubiaceae	Localidad tipo	NA	Wet cloud forest at about 1,600 m., Baja Verapaz (Sierra de las Minas), type from above Purulha.
81	<i>Rondeletia cordovana</i> Standl. & Steyermark.	Rubiaceae	Localidad tipo	NA	Type from cloud forest in ravine bordering Quebrada Alejandria, summit of Sierra de las Minas, vicinity of Finca Alejandria, Zacapa, 2,500 m.
82	<i>Hoffmannia quadrifolia</i> Standl. & Steyermark.	Rubiaceae	Localidad tipo	NA	Known only from the type, Zacapa, Sierra de las Minas, around the summit of Monte Virgen, about 2,400 m.
83	<i>Athenaea viscosa</i> (Schradner) Fern.	Solanaceae	Localidad tipo	NA	(type from below Finca Alejandria, Sierra de las Minas, Zacapa. In pine forested canyons, 2,000 m.; Zacapa. Mexico.
84	<i>Commelinia Standleyi</i> Steyermark in Standl. & Steyermark.	Commelinaceae	Endemica S.M.	NA	On rather dry slopes in pine forest, 1,000-2,000 meters; endemic; Zacapa (Sierra de las Minas; type collected along trail between Rio Hondo and summit of mountain at Finca Alejandría).
85	<i>Vaccinium minarum</i> Standl. & Steyermark.	Ericaceae	Endemica S.M.	Rosito, 1999; González, 2001 Vargas, 1999.	At 2,000-3,200 meters; endemic; Zacapa (type from middle and upper slopes of Volcan Gemelos, Sierra de las Minas; also collected between Loma Pichaco and Cerro de los Monos).
86	<i>Galactia sparsiflora</i> Standl. & Steyermark.	Fabaceae	Endemica S.M.	NA	Chiefly in pine forest, 2,000-3,000 meters; endemic; El Progreso (type collected in forest east of Finca Piamonte, Sierra de las Minas).
87	<i>Phyllonoma cacuminis</i> Standl. & Steyermark.	Grossulariaceae	Endemica S.M.	Medinilla Oscar, 1999.	Wet mixed forest, 2,000-2,600 meters; endemic; Zacapa (Sierra de las Minas) type

					from Quebrada Alejandria, summit of Sierra de las Minas, 2,500 meters.
88	<i>Conostegia hirtella</i> (Sw.) Urban	Melastomataceae	Endemica S.M.	CECON, 2002	Bosque muy húmedo subtropical cálido, Pazós, Alta Verapaz
89	<i>Piper punctulatum</i> Standl. & Steyerm.	Piperaceae	Endemica S.M.	NA	1,500-2,600 meters; endemic, (type from Sierra de las Minas, between Finca Piamonte and top of Montana Piamonte; Zacapa (Sierra de las Minas).
90	<i>Serjania lateritia</i> Radlk.	Sapindaceae	Endemica S.M.	NA	Dry brushy slopes, 1,200-1,600 meters. Endemic; Baja Verapaz (type from Santa Rosa; Zacapa (Sierra de las Minas).
91	<i>Bourreria</i> sp.	Boraginaceae	Endemica S.M	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
92	<i>Bursera steyermarkii</i> Standl.	Burseraceae	Endemica S.M	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
93	<i>Escontria lepidantha</i> (Eichlam)Buxb.	Cactaceae	Endemica S.M	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
94	<i>Mammillaria voburnensis</i> Britt. & Rose var <i>eichlamii</i>	Cactaceae	Endemica S.M	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
95	<i>Myrtillocactus eichlamii</i> Britt. et Rose	Cactaceae	Endemica S.M	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
96	<i>Tradescantia velutina</i> Kunth et Bouché	Commelinaceae	Endemica S.M	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
97	<i>Erythroxylon fiscalense</i> Standl.	Erythroxylaceae	Endemica S.M	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
98	<i>Abutilon tridens</i> Standl. & Steyerm.	Malvaceae	Endemica S.M	NA	Moist ravines or forest, 1,500-2,500 meters; endemic; El Progreso (type from hills between Finca Piamonte and the slopes southeast, along a small creek; Zacapa (Sierra de las Minas, Rio Sitio Nuevo and Rio Repolla).
99	<i>Leucaena collinsii</i> subsp. <i>zacapa</i> C. E. Hughes	Mimosaceae	Endemica S.M	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
100	<i>Mimosa zacapana</i> Standl. et Steyerm.	Mimosaceae	Endemica S.M	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
101	<i>Macromitrium altituberculosum</i> Bartr.,	Musgo	Endemica S.M	NA	Dept. Zacapa: Sierra de las Minas, oak-pine woods along the upper reaches of Rio Sitio Nuevo, between Santa Rosalia and first waterfall, alt. 1,200-1,500 m., on rock. Endemic.
102	<i>Pireella falcifolia</i> Bartr.	Musgo	Endemica S.M	NA	Dept. Zacapa: Cloud forest in ravine bordering Quebrada Alejandria, summit of Sierra de las Minas, vicinity of Finca Alejandria, alt. 2,500 m.
103	<i>Podopterus guatemalensis</i> Blake	Polygonaceae	Endemica S.M	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso
104	<i>Psychotria chrysocalymma</i> L.	Rubiaceae	Endemica S.M	Rosito, 1999; González, 2001; Vargas, 1999.	bosque muy húmedo montano bajo y montano
105	<i>Serjania lobulata</i> Standl & Steyermark	Sapindaceae	Endemica S.M	Véliz et. Al. 2003.	Monte espinoso

Entre las especies endémicas que no han sido encontradas por los estudios actuales, vale la pena mencionar que existen 7 especies exclusivas de la Sierra de las Minas. Dichas especies son:

1. *Serjania lateritia* Radlk. (Sapindaceae)
2. *Piper punctulatum* Standl. & Steyerm. (Piperaceae)
3. *Galactia sparsiflora* Standl. & Steyerm. (Fabaceae)
4. *Commelina Standleyi* Steyermark in Standl. & Steyerm. (Commelinaceae)

5. *Pireeella falcifolia* Bartr. (Musgo)
6. *Macromitrium altituberculosum* Bartr. (Musgo)
7. *Abutilon tridens* Standl. & Steyerm. (Malvaceae)

Ahora bien, las restantes 22 especies reportadas para la Sierra de las Minas pero que no se han encontrado en los estudios florísticos actuales son las siguientes:

1. *Ilex quercetorum* I. M. Johnston (AQUIFOLIACEAE)
2. *Anthurium subcordatum* Schott (ARACEAE)
3. *Oreopanax steyermarkii* A. C. Smith.
4. *Geonoma Seleri* Burret. (AREACEAE)
5. *Chamaedorea digitata* Standl. & Steyerm. (ARECACEAE)
6. *Chamaedorea lehmannii* Burret. (AREACEAE)
7. *Eupatorium hypodictyon* Rob. (ASTERACEAE)
8. *Eupatorium montigenum* Standl. & Steyerm. (ASTERACEAE)
9. *Eupatorium ovillum* Standl. & Steyerm. (ASTERACEAE)
10. *Mahonia Johnstonii* Standl. & Steyerm. (BERBERIDACEAE)
11. *Galactia discolor* Donn. Smith. (FABACEAE)
12. *Beaucarnea guatemalensis* Rose. (LILIACEAE)
13. *Dorstenia Contrajerva* var. *tenuiloba* (Blake) Standl. & Steyerm. (MORACEAE)
14. *Epidendrum Schweinfurthianum* Correll (ORCHIDACEAE)
15. *Epidendrum sobralioides* Ames & Correll. (ORCHIDACEAE)
16. *Goodyera major* Ames & Correll. (ORCHIDACEAE)
17. *Piper brujoense* Trelease & Standley. (PIPERACEAE)
18. *Piper tecutlanum* Trelease & Standley. (PIPERACEAE)
19. *Peperomia condormiens* Trelease. in Yuncker. (PIPERACEAE)
20. *Peperomia tacticana* Trelease & Standley. (PIPERACEAE)
21. *Guamatela Tuerckheimii* Donn. Smith. (ROSACEAE)
22. *Psychotria pachecoana* Standl. & Steyerm. (RUBIACEAE)

CAPITULO III

Ecohidrología con énfasis en el análisis biofísico de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en cuatro subcuenca de la RBSM.

CAPÍTULO III.I

**Estudio de la recarga hídrica natural en cuatro subcuencas de la RBSM,
mediante la aplicación del balance hídrico de suelos propuesto por
Schosinsky.**

Contenido

Resumen	89	
1	Introducción	90
2	Objetivos	91
2.1	Objetivo general	91
2.2	Objetivos específicos	91
3	Metodología.	92
3.1	Fase de gabinete inicial.....	92
3.2	Fase de Campo.....	93
3.3	Fase Gabinete Final.....	94
3.4	Clasificación de zonas de Recarga Hídrica Natural.....	97
4	Resultados y discusión.	98
4.1	Hidrología general de las cuatro subcuenca.....	98
4.2	Clasificación de las zonas de recarga hídrica e implicaciones en la zonificación de la RBSM.....	105
4.3	Análisis de la recarga hídrica a escala de microcuenca.....	108
5	Conclusiones	112
6	Bibliografía	113
7	Anexos	119
7.1	Determinación de la Infiltración Básica	119
7.2	Determinación de las Unidades de Mapeo de la subcuenca Teculután	121

Índice de Figuras

Figura 1. Secuencia de la sobreposición de información cartográfica temática para determinar las unidades de mapeo para elaboración de pruebas de infiltración.	93
Figura 2. Unidades de mapeo (UM) derivadas de la sobreposición de mapas de geología, suelos y cobertura vegetal para la región hidrológica de sotavento.....	101
Figura 3. Unidades de mapeo (UM) derivadas de la sobreposición de mapas de geología, suelos y cobertura vegetal para la región hidrológica de transición (San Jerónimo, izquierda) y de barlovento (Pueblo Viejo, derecha).....	102
Figura 4. Análisis comparativo entre % de superficie y % de recarga hídrica por cada unidad de mapeo (UM) en las subcuencas estudiadas	103
Figura 5. Clasificación de las zonas de recarga hídrica en las subcuencas de sotavento (colores sólidos identificados en la leyenda de cada mapa) y las zonas de conservación de la RBSM (líneas rosadas)	106
Figura 6. Clasificación de las zonas de recarga hídrica (colores sólidos identificados en la leyenda de cada mapa) en las subcuencas de las regiones hidrológicas de transición (izquierda) y de barlovento (derecha) y las zonas de conservación de la RBSM (líneas rosadas)	107
Figura 7. Principales variables del balance hídrico de las subcuencas de sotavento (Pasabien y Tecutlán).....	109
Figura 8. Análisis comparativo de las principales variables del balance hídrico.....	110
Figura 9. Relación entre lámina de recarga y lámina de precipitación de todas las microcuencas analizadas para las tres regiones hidrológicas (sotavento, barlovento y zona de transición).....	111
Figura 10. Relación entre lámina de recarga y lámina de balance hídrico atmosférico (precipitación – ETR) de todas las microcuencas analizadas para las tres regiones hidrológicas (sotavento, barlovento y zona de transición)	111

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Valores de coeficientes (Kp) según valores de pendientes.	95
Cuadro 2. Valores de coeficientes (Kv) según tipo de cobertura vegetal.	95
Cuadro 3. Radiación solar extraterrestre, RMM, expresada en evaporación equivalente a mm/día.	96
Cuadro 4. Duración máxima media diaria de horas de brillo solar para diferentes meses y latitudes.	97
Cuadro 5. Clasificación de las zonas de mayor recarga hídrica natural por medio de la lámina de recarga anual (Herrera 2,004).	97
Cuadro 6. Balance volumétrico de la recarga hídrica en las subcuencas estudiadas.....	99
Cuadro 7. Balance y distribución proporcional de las principales variables de la recarga hídrica en las subcuencas estudiadas.	99
Cuadro 8. Datos hídricos y descriptores biofísicos de las unidades de mapeo con mayor recarga hídrica de las cuatro subcuencas	104

Resumen

La presente investigación tiene el objetivo principal de analizar la recarga hídrica natural en cuatro subcuencas representativas de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas (RBSM). Dichas subcuencas son: Pasabien y Teculután (ubicadas en la región hidrológica de sotavento), San Jerónimo (región transicional entre barlovento y sotavento) y Pueblo Viejo (barlovento).

Para tal fin se utilizó la propuesta metodológica de Schosinsky, la cual consiste en la realización de un balance hídrico de suelos. Tiene la característica que puede implementarse con información biofísica básica y edáfica de campo. Dicha metodología ha sido difundida por diversas instituciones, tal como el Instituto Nacional de Bosques y la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Es importante su validación mediante ejercicios prácticos de hidrología aplicada a la gestión de los servicios de regulación hidrológica.

Uno de los aportes de este estudio es que logra reunir o generar información de relativo fácil acceso para aportar significativamente en la comprensión de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica. De esta manera se analizan las grandes diferencias hidroclimáticas de la RBSM. Desde el punto de vista hidroclimático las cuatro subcuencas presentan, valores que se pueden considerar de alta recarga hídrica. Como referencia se puede indicar que cada una de ellas podría suplir a más dos millones de personas o más, esto considerando un consumo diario de 100 litros por persona y sin considerar distribución temporal o caudales ecológicos. En conjunto pueden abastecer cerca de 20 millones de personas.

Sin embargo se evidenció grandes diferencias en las regiones hidrológicas estudiadas. Las subcuencas de sotavento, Pasabien y Teculután presentan láminas de recarga hídrica entre 600 y 850 mm y una disponibilidad hídrica (recarga hídrica más escorrentía) promedio de cerca del 58% de la lluvia. Las áreas de mayor recarga presentan factores que relacionan la recarga y la superficie superiores a 2. Es decir que en un área que cubre 10% de la superficie se puede recargar el 20 o hasta el 40% del total de la subcuenca. La subcuenca de la región hidrológica de transición, San Jerónimo, presenta valores relativamente bajos en cuanto a disponibilidad hídrica, la más baja evaluada, de cerca de 675 mm (47% de la lluvia total).

Contrastantemente la subcuenca ubicada en barlovento, Pueblo Viejo presenta una lámina de una lámina de recarga mayor a 2000 mm de recarga. Son tan altos sus valores de recarga hídrica, que en esta región se triplica la lámina de recarga de la región de sotavento y es cuatro veces mayor a la de la región de transición. Se analizó que la zona núcleo de la RBSM recarga una la lámina promedio anual superior a 1,000 mm (equivalente 10,000 m³/ha), llegando a valores cercanos a los 3,000 mm, de donde se deriva la necesidad de seguir protegiendo la cobertura natural y los procesos de recarga hídrica con ésta categoría de conservación.

El método empleado, propuesto por Schosinsky, se considera muy adecuado y pertinente para el análisis de los balances hídricos con énfasis en la recarga hídrica natural. El uso de la cartografía de microcuencas propuesta por las instituciones de Guatemala también se considera pertinente para el estudio de la hidrología, en regiones contrastantes, a escalas de microcuencas. Los métodos de análisis empleados fueron muy útiles y adecuados para el análisis general de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en la RBSM, contribuyendo así a los procesos de conservación y gestión.

1 Introducción

Existe preocupación por el deterioro del servicio de regulación hídrica en las subcuenca de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas (RBSM). Esta se vincula presumiblemente al cambio de uso del suelo y el desconocimiento de los procesos hidrológicos en las principales áreas de recarga. Para contrarrestar estos aspectos se hace necesario la generación e implementación de metodologías prácticas, que incluyan la integración de información disponible en el medio institucional o fácil de generar, para la comprensión de los procesos hidrológicos, identificar las zonas de alta recarga hídrica y, consecuentemente, desarrollar instrumentos de gestión adecuados por parte de las entidades que administran el área protegida.

Bajo este contexto se plantea la presente investigación que se denomina: Estudio de la recarga hídrica potencial en cuatro subcuenca de la RBSM mediante la aplicación del método de balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky.

Dicha metodología ha sido difundida por instituciones ambientales guatemaltecas y se caracteriza por emplear información biofísica básica, toma de datos de suelos en campo y la elaboración de balances hídricos de suelos (Instituto Nacional de Bosques. Guatemala., 2003).

Está basada, principalmente, en la distribución de precipitación y coeficientes de infiltración de los suelos. Para evaluar la infiltración de lluvia que penetra al suelo en una zona, se determinan: la precipitación mensual de la zona, los diferentes valores de infiltración básica de los suelos, la cobertura vegetal del suelo y su pendiente. Determinados los valores anteriormente mencionados, se puede evaluar la infiltración mediante la ecuación presentada elaboradas para tal fin (Schosinsky & Losilla, 2000; Schosinsky, 2006).

Conocida la infiltración, se puede realizar un balance de suelos determinando el agua que queda libre para recargar el acuífero que se encuentra debajo del suelo analizado. Para la realizar el balance hídrico se determinan: la infiltración de lluvia que penetra al suelo, la cobertura vegetal del suelo, la profundidad de las raíces extractoras del agua, la capacidad de campo, el punto de marchitez del suelo, la evapotranspiración potencial y la humedad del suelo al inicio del análisis (Schosinsky, 2006).

El estudio del balance de suelos se basa en el principio de la conservación de la materia. O sea, el agua que entra a un suelo, es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él. Las entradas están vinculadas a la precipitación y las salidas principales son interceptación por parte de la vegetación, infiltración profunda (recarga), evapotranspiración de las plantas, la escorrentía superficial espontánea proveniente del exceso de agua en el suelo y la descarga de los acuíferos (Schosinsky, 2006; Schosinsky & Losilla, 2000).

Esta investigación se enmarca en la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, sin embargo el análisis puede ser interpolado hacia otras regiones en Centroamérica que cuenten características biofísicas similares y tengan déficit de información hidrológica.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar la recarga hídrica natural en las subcuencas Teculután, Pasabien, Pueblo Viejo y San Jerónimo en la RBSM

2.2 Objetivos específicos

- Integrar la información biofísica y geográfica de las subcuencas
- Recopilar la información ecológica y edáfica de campo.
- Analizar la recarga hídrica de suelos mediante la implementación de una balance hídrico de suelos.
- Analizar las implicaciones para los objetivos de conservación de la RBSM

3 Metodología.

El presente estudio se realizó en la RBSM con énfasis en cuatro subcuencas representativas, las cuales son Pasabien, Teculután, ubicadas en la región hidrológica de sotavento, Pueblo Viejo, ubicada en barlovento, y San Jerónimo localizada en una región transicional al oeste del Sierra de las Minas. Aspectos hidrológicos y climáticos generales ya fueron abordados en capítulos anteriores, para mayor información consultar Capítulo II.

A continuación se describen de manera general los procesos metodológicos generales que se llevaron a cabo para el balance hídrico de suelos y la determinación de la recarga hídrica. Fue necesario desarrollarlo en tres fases, estas se presentan en un breve resumen a continuación:

Recopilación de información básica, tal como la delimitación de las subcuencas y respectivas microcuencas. Además se integró la cartografía de geología, suelos y cobertura del suelo. A partir de la intersección de estos últimos se logró la delimitación de las unidades de mapeo, las cuales en términos prácticos son las unidades muestreo o unidades de respuesta hidrológica. Asimismo se integraron los datos climáticos de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial, generados a partir de los mapas de isolíneas abordados en acápite anteriores.

La fase de campo incluyó, para cada unidad de mapeo definida, la elaboración de las pruebas de infiltración (método Porchet), obtención de la profundidad efectiva representativa, toma de muestra de suelo para su análisis de laboratorio, de tal manera que se obtuvieran las siguientes características: a) físicas granulometría, densidad aparente y, b) constantes de humedad, es decir, punto de marchitez permanente y capacidad de campo. Un aspecto importante generado en campo fue la determinación de las velocidades de infiltración para la posterior estimación de la infiltración básica.

A partir de la información recabada en gabinete inicial y con el auxilio de hojas electrónicas (Excel) de balance hídrico propuestas por Schosinsky, se calculó la recarga mensual y anual para cada unidad de mapeo definida. Finalmente se derivaron mapas de recarga hídrica de cada subcuenca y se realizaron análisis del comportamiento de ésta recarga de acuerdo a sus propiedades biofísicas a escala de microcuencas y subcuencas. A continuación se detalla la metodología empleada, la cual está basada principalmente en el trabajo de Schosinsky e implementada y divulgada por INAB en Guatemala (Schosinsky, 2006; Instituto Nacional de Bosques. Guatemala., 2003).

3.1 Fase de gabinete inicial.

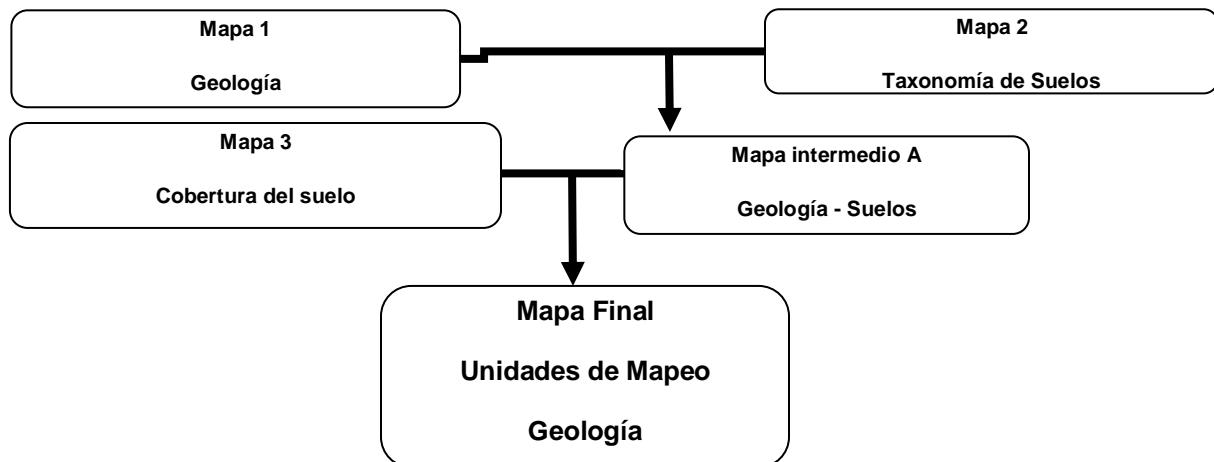
Recopilación de Información Base. Se recopiló información cartográfica digital disponible, la cual ha sido generada por el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (SIG – MAGA) y el Centro de Información Geográfica de la Fundación Defensores de la Naturaleza (CIGDEF): a) delimitación de la cuenca (escala 1:50,000), modelo de elevación (DEM); Geología (escala 1:250,000) suelos (1:50,000), y Cobertura Vegetal del año 2,003 y 2007 (Escala 1:50,000).

La información climática más importante tomada como referencia a partir de la generación de isolíneas de las variables más importantes (precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial) es la siguiente: a) datos emanados del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología - INSIVUMEH –, para sotavento, las estaciones Albores (1,500 msnm), ubicada en San Agustín Acasaguastlán, El Progreso; Pasabién (260 msnm) San Lorenzo (1750

msnm) Río Hondo, Zacapa. b) datos de una estación privada, Chilascó, (1800 msnm), ubicada en el poblado del mismo nombre en el departamento de Baja Verapaz. c) estaciones colocadas por la administración de la Fundación Defensores de la Naturaleza, en la región de barlovento: Pancajoc (300 msnm), La pinada Pancajoc (900 msnm) y San Vicente (300 msnm); todas ubicadas en el Departamento de Alta Verapaz. Las variables que se usaron son: Precipitación (mm), Temperaturas en °C (Máximas, Medias y Mínimas) y Humedad Relativa %; con ocho, trece y seis años de registros respectivamente e información de la estación de la Reserva de Biosfera Sierra de las Minas, ubicada en San Vicente (1,100 msnm), en Panzós, Alta Verapaz.

Determinación de las Unidades de Mapeo.

Definir las unidades de mapeo de acuerdo a las variables de geología, suelos y cobertura vegetal; con ayuda de SIG (ArcView) se sobrepusieron los mapas geológico y de suelos, esto dio como resultado el mapa A: Geología – Suelos; el mapa A se sobrepuso con el de Uso Actual de Tierra 2,003 dando como resultado el mapa final de Unidades de Mapeo.



FUENTE: Elaboración propia.

Figura 1. Secuencia de la sobreposición de información cartográfica temática para determinar las unidades de mapeo para elaboración de pruebas de infiltración.

3.2 Fase de Campo.

Inicialmente se verificaron de manera general las diferentes unidades de mapeo para validar la información cartográfica, especialmente, su uso actual. Asimismo se procedió a ubicar el área más representativa para realizar la prueba de infiltración. Se realizaron las pruebas de infiltración en cada unidad de mapeo. Para ello se empleó el método Porchet (Custodio & Llamas, 1983). Este método consiste en perforar un agujero con un barrenó de suelos, luego se satura el agujero con agua y se procede a medir la infiltración, es decir el movimiento descendente de la columna de agua a intervalos de un minuto como mínimo (para mayor información consultar anexos). También se tomaron muestras de suelo para determinar a través de análisis de laboratorio, textura, constantes de humedad (capacidad de campo y punto de marchitez permanente) y densidad aparente por el método de probeta, esto se realizó en el Laboratorio de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.3 Fase Gabinete Final.

Se calculó el balance hídrico de suelos siguiendo el procedimiento propuesto Schosinsky, el cual se resume a continuación:

Determinación de la Precipitación Efectiva. La precipitación efectiva pudo definirse a través de la siguiente fórmula:

$$Pef = (1 - Ki) \times Ci \times P$$

Donde:

Pef = Precipitación efectiva (precipitación que infiltra o infiltración profunda)

Ki = Valor de retención vegetal (hojas). Para bosque, la retención es de 0.20, para cultivos en general 0.12 y para techos de casas, caminos y áreas construidas es de 0.1 a 0.05

Ci = Coeficiente de infiltración ($Kfc + Kp + Kv$)

P = Precipitación mensual

Para el cálculo del coeficiente de infiltración (Ci) es importante que se consideren los siguientes tres aspectos:

- a) la relación que existe entre la infiltración y la precipitación Kfc es decir la precipitación que infiltra por efecto del suelo.
- b) La fracción que infiltra por el efecto de la pendiente es la relación entre la infiltración y la pendiente del terreno Kp y
- c) el efecto de la cobertura Kv que es la relación entre la infiltración y el tipo de cobertura vegetal.

La sumatoria de todos los valores de estas variables nos proporciona el coeficiente de infiltración, este resultado es para determinado suelo y la capacidad de infiltración del mismo.

$$Ci = Kfc + Kp + Kv$$

Factor de la relación entre la infiltración e intensidad de lluvia (Kfc).

Determinación de la relación entre la Infiltración del agua en suelos y la intensidad de Lluvia (Kfc). La ecuación que relaciona la capacidad de infiltración de agua en el suelo (infiltración básica – fc) con la intensidad de lluvia es:

$$Kfc = 0.267 \times \ln(fc) - 0.000154 \times (fc) - 0.723$$

Donde:

Kfc = Factor de infiltración de agua en el suelo e intensidad de lluvia

\ln = Logaritmo natural

fc = Valor de infiltración básica en mm/h

Para que la formula anterior se pueda utilizar debe tomarse un rango de funcionamiento de $16 \leq fc \leq 1,568$. Para valores de fc menores de 16 se utiliza la formula siguiente:

$$Kfc = 0.0148 \times /16$$

Donde:

x = valor de fc (menor o igual a 16)

Factor por Pendiente del Terreno (Kp).

Los valores de pendientes del terreno se presentan a continuación en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Valores de coeficientes (Kp) según valores de pendientes.

Valor de pendiente	Coeficiente (Kp)
Muy plana (0.02-0.06%)	0.30
Plana (0.3-0.4%)	0.20
Algo plana (1-2%)	0.15
Promedio (2-7%)	0.10
Fuerte (>7%)	0.06

FUENTE: INAB - FAUSAC 2,003.

Factor por Cobertura Vegetal del terreno (Kv).

Los factores de cobertura vegetal utilizados fueron los que se presentan en el Cuadro 2:

Cuadro 2. Valores de coeficientes (Kv) según tipo de cobertura vegetal.

Cobertura Vegetal	Coeficiente (Kv)
Gramíneas o zacate (< 50%)	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Con pastizales	0.18
Bosques	0.20
Zacate (>75%)	0.21

FUENTE: INAB - FAUSAC 2,003.

Cálculo de la Recarga Hídrica Natural. Para realizar el cálculo de recarga hídrica del área de estudio, mediante un balance hídrico de suelos, fue necesaria la integración de la siguiente información:

Precipitación pluvial y efectiva (ya obtenida)

Evapotranspiración potencial y real

Tipo definido de cobertura vegetal.

Lámina de humedad del suelo (en base a constantes de humedad).

El cálculo se realizó con la siguiente ecuación:

$$Rh = Pef + HIS - HFS - ETR$$

Donde:

Rh: Recarga Hídrica.

Pef: Precipitación Efectiva.

HIS: Humedad Inicial en el Suelo.

HFS: Humedad Final en el Suelo.

ETR: Evapotranspiración Real.

Determinación de la Evapotranspiración Potencial y Real. La evapotranspiración real depende de factores muy variables como el contenido de humedad en el suelo y el desarrollo vegetal en la planta los cuales son muy difíciles de medir. Generalmente se utilizan métodos indirectos para su estimación a partir de la evapotranspiración potencial. Conceptualmente la evapotranspiración real sucede únicamente cuando hay humedad en el suelo. Para esta investigación se obtendrá de la siguiente manera:

$$ETPR = (HS - PM)(ETP)/(CC-PM)$$

Donde:

ETPR [mm/día] = Evapotranspiración potencial real

HS [%] = Humedad del suelo

ETP [mm/día] = Evapotranspiración de la planta a capacidad de campo

CC [%] = Capacidad de campo

PM [%] = Punto de marchitez permanente

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se utilizó el método de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985), el cual emplea datos solamente de temperatura media en y el uso de valores de tablas para la región del país o su latitud. En este sentido es necesario contar con datos del área de estudio. Hargreaves es un método práctico y confiable, su ecuación es:

$$ETP * 0.0075 * TMF * RSM$$

Donde:

ETP: Evapotranspiración en mm/mes.

TMF: Temperatura Media Mensual en grados Fahrenheit.

RSM: Radiación Solar Incidente Mensual.

$$RSM = 0.075 * RMM * S^{1/2}$$

Donde:

RMM: Radiación Mensual Extraterrestre en mm/mes

S: Brillo Medio Mensual (%)

$$RMM = RS * \text{No. de días al mes}$$

Donde:

RS: Radiación Solar, este valor se calculó en función de la ubicación en latitud del país, para el caso de Guatemala es zona 15 de acuerdo a esto se estima con los datos del Cuadro 3 entre las latitudes 14 y 16.

Cuadro 3. Radiación solar extraterrestre, RMM, expresada en evaporación eq. a mm/día.

Latitud Norte	MESES											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
14	12.4	13.6	14.9	15.7	15.9	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0
16	12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6

FUENTE: INAB - FAUSAC 2,003.

$$S = Ks * (100 - HR)^{1/2}$$

Donde:

Ks: Constante igual a 12.5 (Para región Centroamericana).

HR: Humedad Relativa media en %.

Esta ecuación se utiliza cuando se tienen datos de humedad relativa media, en nuestro caso no es así para todas las estaciones, por lo tanto que se calculó a partir del Cuadro 4. Esta es la tabla propuesta por el autor para la latitud norte 15.

Cuadro 4. Duración máxima media diaria de horas de brillo solar para diferentes meses y latitudes.

Latitud Norte	MESES											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
15	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2

FUENTE: INAB - FAUSAC 2,003.

Cálculo del Balance Hídrico de Suelos. Este dato se obtuvo a partir de la siguiente ecuación:

$$Pp = ETR + Esc + Ret + Rec$$

Donde:

Pp: Precipitación Pluvial (mm).

ETR: Evaporación Real (mm).

Esc: Escorrentía Superficial (mm).

Ret: Retención Vegetal (mm).

Rec: Recarga Hídrica (mm).

En donde hay que calcular la escorrentía superficial utilizando la ecuación:

$$\text{Escorrentía} = \text{Precipitación} - \text{Retención} - \text{Precipitación efectiva (infiltración profunda)}.$$

Elaboración del Mapa de Recarga Hídrica Natural.

Para facilitar los cálculos de balance hídrico de suelos para cada unidad de mapeo definida de acuerdo a la metodología expuesta anteriormente se utilizó la hoja de cálculo que el mismo autor propone (para mayor información consultar Schosinsky 2006).

3.4 Clasificación de zonas de Recarga Hídrica Natural.

A última etapa en la determinación de la recarga hídrica fue la clasificación de las unidades de mapeo. Para tal fin se utilizó en criterio cuantitativo propuesto por INAB y FAUSCAC, 2003, citando a Herrera (2,002), se basa en la lámina de agua que aporta al sistema cada unidad muestreada.

Cuadro 5. Clasificación de las zonas de mayor recarga hídrica natural por medio de la lámina de recarga anual (Herrera 2,004).

Rango (mm/año)	Criterio	Volumen (m ³ /ha/año)
> 862.5	Muy Alta	> 8,625
575 – 862.5	Alta	5,750 – 8,625
287.5 – 575	Media	2,875 – 5,750
< 287.5	Baja	< 2,875

FUENTE: INAB - FAUSAC 2,003.

A partir de lo anterior se procedió a integrar la información y preparar el material cartográfico correspondiente. Asimismo se analizan algunas implicaciones de los resultados y su relación con la zonificación del área protegida RBSM.

4 Resultados y discusión.

4.1 Hidrología general de las cuatro subcuencas

En términos generales se evidenció que la recarga hídrica en las cuatro subcuencas representativas de tres diferentes regiones hidrológicas de las Sierra de las Minas es relativamente alta. La recarga menor en términos volumétricos es en la subcuenca Pasabien, la cual asciende a más de 100 millones de m³ anualmente. Para dimensionar esta recarga se puede tomar como dato de referencia que el agua recargada en esta subcuenca alcanzaría para abastecer a cerca de tres millones de personas (si consideramos 100 litros de consumo diario), esto sin contar caudales ecológicos ni distribución temporal. Las otras subcuencas pueden abastecer también a 4.8, 4.2, 10.2 millones de personas en las subcuencas Teculután, San Jerónimo y Pueblo Viejo, respectivamente (Cuadro 6). Todas las láminas de recarga anual son superiores a 500 mm, lo cual puede considerarse adecuado y, en términos generales, de alta “producción” hídrica. Incluso los valores de lluvia que recargan oscilan entre aproximadamente 40 y 60%, siendo Teculután la que menor porcentaje presenta con el 39% de la lluvia y Pueblo Viejo en la que este valor es mayor (Cuadro 6).

Es remarcable que existen altas diferencias entre las subcuencas, de acuerdo a su ubicación en las diferentes regiones hidrológica. Las subcuencas de sotavento, Pasabien y Teculután tienen comportamientos hidrológicos similares con láminas de precipitación entre 1500 y 1800, y de recarga hídrica de entre 600 y 850 mm, respectivamente. Asimismo presentan una disponibilidad hídrica (recarga hídrica más escorrentía) promedio de cerca del 58% de la lluvia (Cuadro 7)

La subcuenca de la región hidrológica de transición, San Jerónimo, presenta valores relativamente bajos en cuanto a lámina de precipitación cercados a 1450 mm, lámina de ETR relativamente alta de 576 mm, equivalente al 40% (la más alta de las regiones hidrológicas evaluadas) y una disponibilidad hídrica, también la más baja de cerca de 675 mm (47%) (Cuadro 7). Contrastantemente la subcuenca Pueblo Viejo, ubicada en barlovento, tiene una lámina de precipitación promedio de cerca de 3800 mm y una lámina mayor a 2000 mm de recarga. Son tan altos sus valores de recarga hídrica, que en términos generales, en esta subcuenca se triplica la lámina de recarga en relación a las subcuencas de sotavento y es cuatro veces mayor a la de la región de transición (Cuadro 7). Los valores de escorrentía se presentan como los más bajos, de donde se infieren suelos muy profundos y alta conductividad hidráulica

Cuadro 6. Balance volumétrico de la recarga hídrica en las subcuencas estudiadas.

Región hidrológica	Subcuenca	Extensión (ha)	Entrada	Salidas					Disponibilidad de Agua m ³ (escorrentía + recarga hídrica)	Cantidad de personas potencialmente abastecidas
			Precipitación (m ³)	Retención vegetal (m ³)	Escorrentía de saturación (m ³)	ETR m ³	Recarga Hídrica m ³	% de lluvia que recarga		
Sotavento	Pasabien	10,050	180,944,846	33,316,245	20,414,194	50,315,637	85,563,735	47	105,977,929	963,436
Sotavento	Teculután	20,109	313,723,713	53,422,976	51,424,775	91,919,019	123,000,961	39	174,425,738	1,585,689
Transición	San Jerónimo	22,805	329,443,748	57,559,428	22,187,720	119,656,668	131,254,226	40	153,441,945	1,394,927
Barlovento	Pueblo Viejo	14,867	578,244,705	98,572,695	45,135,608	104,750,217	327,716,935	57	372,852,543	3,389,569

Cuadro 7. Balance y distribución proporcional de las principales variables de la recarga hídrica en las subcuencas estudiadas.

Región hidrológica	Subcuenca	Extensión (ha)	Entrada	Salidas								Disponibilidad hídrica (mm)	%
			Precipitación (mm)	Retención vegetal (mm)	%	Escorrentía (mm)	%	ETR (%)	Recarga hídrica (mm)	%			
Sotavento	Pasabien	10,050	1,801	332	18	203	11	501	28	851	47	1,054.54	59
Sotavento	Tecullután	20,109	1,560	266	17	256	16	457	29	612	39	867.39	56
Transición	San Jerónimo	22,805	1,445	252	17	97	7	525	36	576	40	672.85	47
Barlovento	Pueblo Viejo	14,867	3,890	663	17	304	8	705	18	2,204	57	2,507.97	64

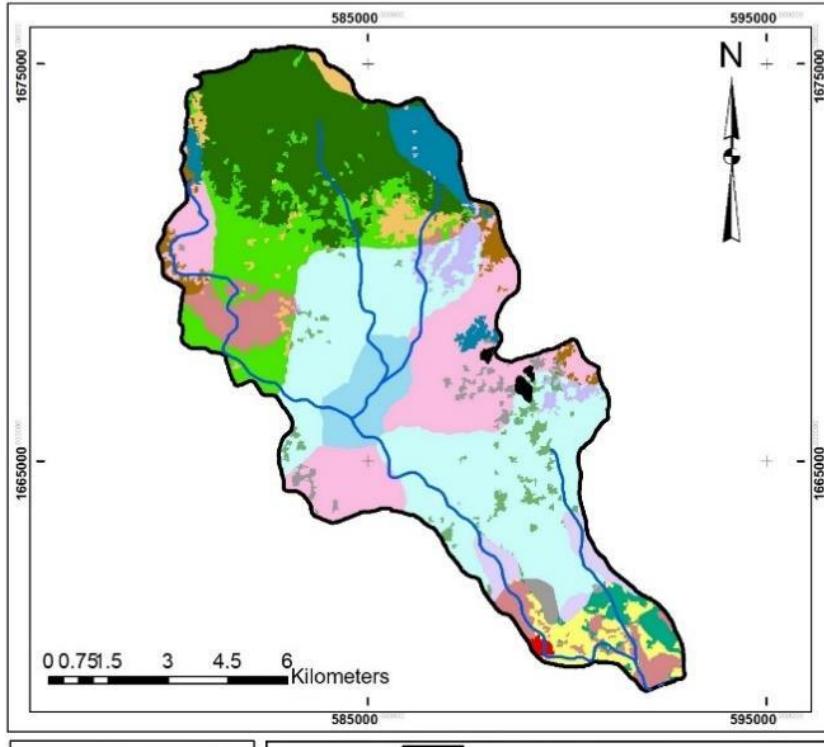
Para comprender estas diferencias y el comportamiento hidrológico de cada región se analizan las unidades de mapeo definidas para cada subcuenca. Estas unidades de mapeo se derivaron de la sobreposición de los mapas de geología, suelos y cobertura del suelo. A cada una de ellas se le realizó un balance hídrico de suelos, de acuerdo a la metodología planteada (en Anexos se presenta un ejemplo de la generación de las unidades de mapeo UM en la subcuenca Teculután). En los cuatro mapas de las subcuencas se pueden identificar geográficamente las 67 unidades de mapeo definidas para las mismas (Figuras 2 y 3). Cada una de estas UM representa una unidad de respuesta hidrológica al integrar condiciones diferenciadas de los principales factores que determinan la recarga hídrica (geología, suelo y cobertura).

En la Figura 4 se puede apreciar que en cada una de estas presenta unidades de mapeo que recargan proporcionalmente mucho más que otras. Para ello se compara su aporte en % de recarga de la cuenca (barra negra) y el % de su superficie (barra marrón). Es notorio también que en Pasabien en la unidad de mapeo 11 (UM 11) estas diferencias son más conspicuas que en las otras y, generalmente, excepto en San Jerónimo, son unidades de mapeo pequeñas y ubicadas en las partes altas de cuenca. La UM 11 en Pasabien es responsable del cerca del 40 % de la recarga de toda la subcuenca y apenas presenta una proporción superficial del 18 %. En Teculután también la unidad de mapeo 12 es responsable de la recarga de cerca del 40% total y tiene una superficie cercana al 25%. Estas diferencias de proporciones de recarga y superficie aunque se evidencian UM que destacan son relativamente menos contrastantes en la subcuenca Pueblo Viejo. Finalmente en San Jerónimo se puede observar una UM que es la responsable del 20% de la recarga con una superficie cercana al 12 %.

En el Cuadro 8 se presentan, para cada subcuenca, las tres unidades de mapeo con mayor factor de recarga respecto a su superficie y se describen sus principales características biofísicas, es decir, aquellas que definieron la delimitación de las unidades de mapeo, las cuales son: geología, suelos y cobertura del suelo. En términos generales se puede concluir lo siguiente: a) el factor que relaciona % de recarga y % de superficie es mucho mayor en la unidades de mapeo presentadas para sotavento, especialmente en Pasabien con un valor de cerca de 5. Aunque para Teculután también se presentan valores altos, arriba de 2. Las láminas de recarga en estas dos subcuencas son más del doble del promedio para cada una de ellas. Dichos factores son menores para Pueblo Viejo y San Jerónimo, siendo estos en promedio muy cercanos a 1.5. Es decir que en las subcuencas Pueblo Viejo y San Jerónimo las condiciones de recarga son más uniformes.

- b) No se evidenció alguna geología en donde prevalezcan estos altos rendimientos en cuanto a recarga. Sin embargo la geología CPsr, rocas sedimentarias del Carbonífero (predominantemente rocas calizas?) si presenta láminas significativamente mayores de recarga, arriba de 2,000 mm. Es de hacer notar que esta zona está ubicada en un sitio de altas precipitaciones. Esto sugiere que las formaciones geológicas existentes en la zona, interactuando con las condiciones climáticas, generan suelos con altas capacidades de captación o recarga hídrica. Es importante entonces profundizar el análisis respecto a la interacción de los ecosistemas con las condiciones climáticas.
- c) Hay diversidad de suelos en donde hay altos valores relativos de recarga, sin embargo se puede afirmar que todos ellos presentan relativamente más desarrollo, es decir formación de perfiles y profundidad, lo cual resulta bastante obvio por la interacción suelo, lluvia y vegetación con la que se han desarrollado.
- d) Las unidades de mapeo con altos valores relativos de recarga presentan diversas coberturas, tal como bosque, cultivo de cardamomo en Pueblo Viejo, o cobertura de matorrales naturales.

Unidades de Mapeo de la Subcuenca río Pasabien



Proyección del mapa digital
UTM zona 15 DATUM WGS84
Proyección del mapa impreso:
Coordenadas geográficas,
Esferoide de Clarke 1886

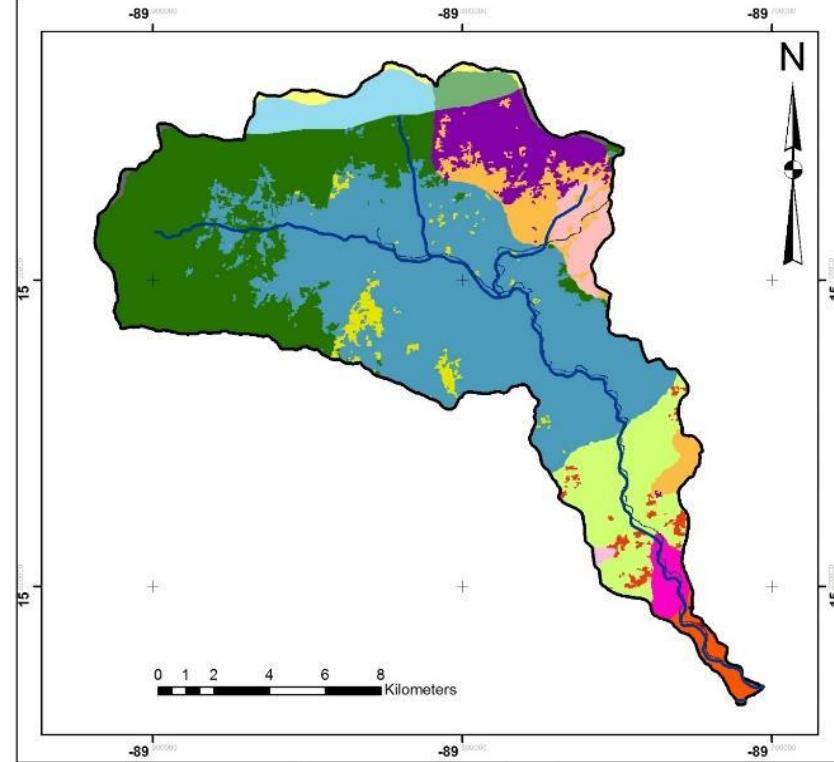
Fuente: Elaboración propia
IGN, 2001, FDN

Guatemala, mayo de 2010

Leyenda

Subcuenca Pasabien	Ríos		
Minas	UM 01	UM 06	UM 11
NC	UM 02	UM 07	UM 12
Poblado	UM 03	UM 08	UM 13
Río	UM 04	UM 09	UM 14
	UM 05	UM 10	UM 15

Unidades de Mapeo de la Subcuenca del río Teculután



Proyección del mapa digital
UTM zona 15 DATUM WGS84
Proyección del mapa impreso:
Coordenadas geográficas,
Esferoide de Clarke 1886

Fuente: Elaboración propia
IGN, 2001, FDN

Guatemala, mayo de 2010

Leyenda

Subcuenca	Ríos	
Cementerio	UM 03	UM 09
NC	UM 04	UM 10
Poblado	UM 05	UM 11
Río	UM 06	UM 12
	UM 01	UM 07
	UM 02	UM 13
		UM 08
		UM 14

Figura 2. Unidades de mapeo (UM) derivadas de la sobreposición de mapas de geología, suelos y cobertura vegetal para la región hidrológica de sotavento.

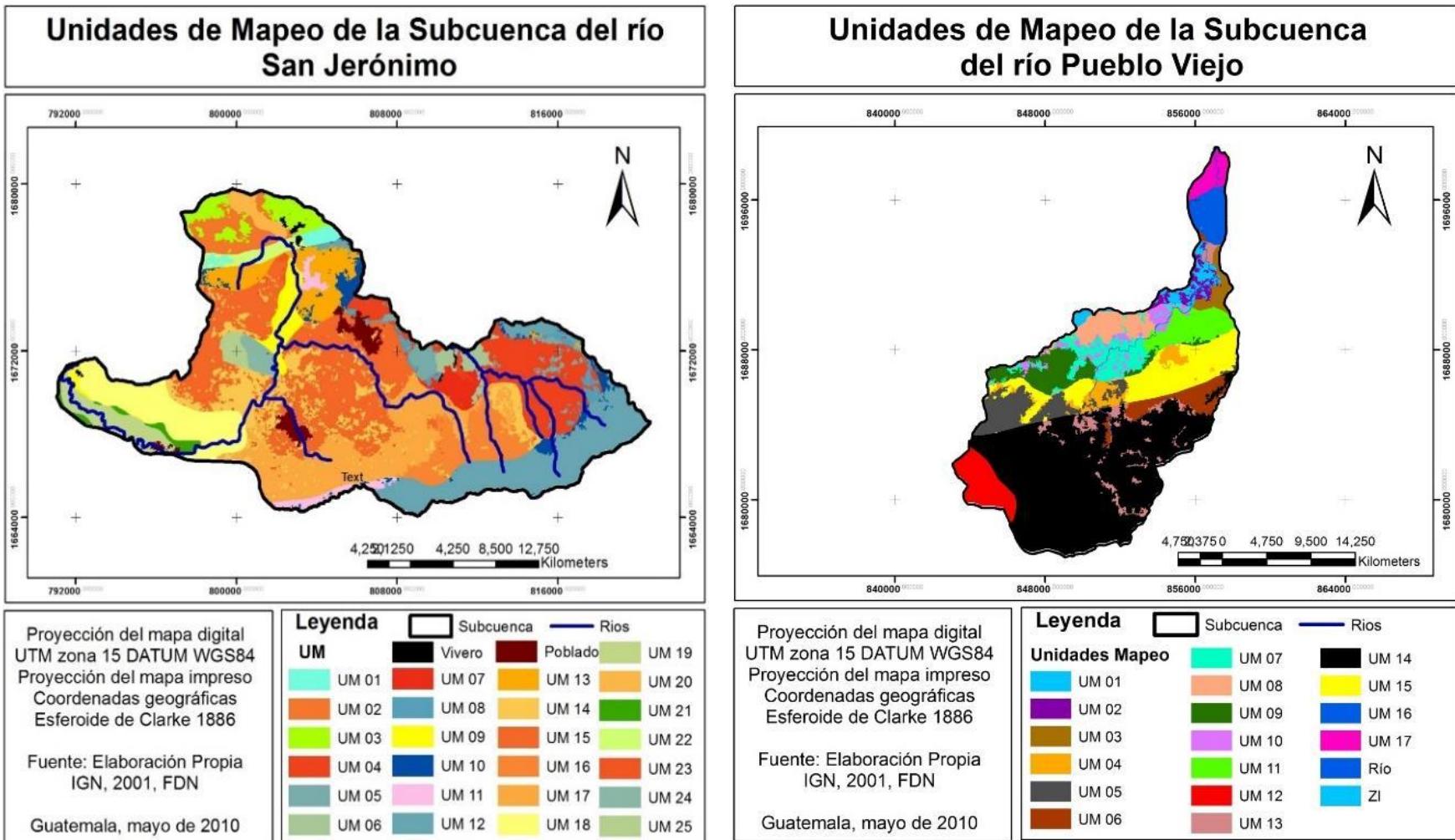


Figura 3. Unidades de mapeo (UM) derivadas de la sobreposición de mapas de geología, suelos y cobertura vegetal para la región hidrológica de transición (San Jerónimo, izquierda) y de barlovento (Pueblo Viejo, derecha).

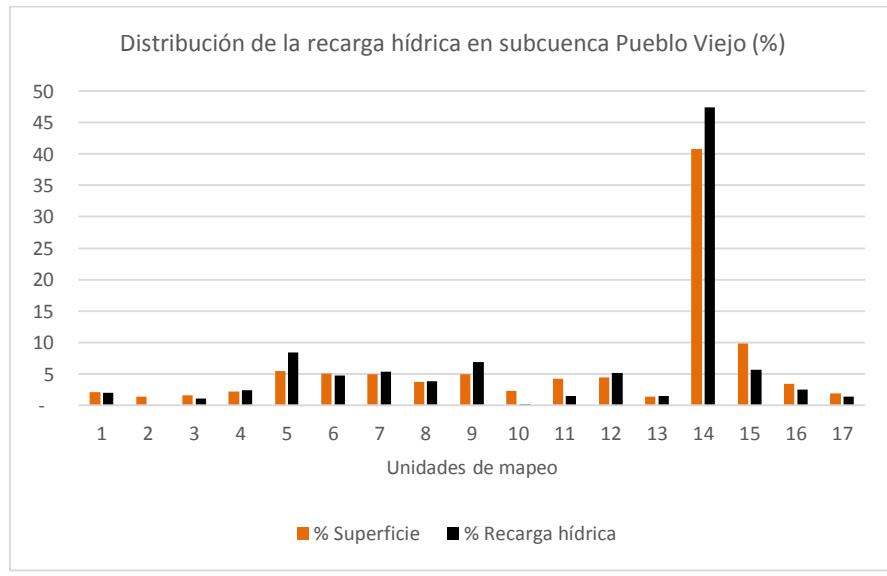
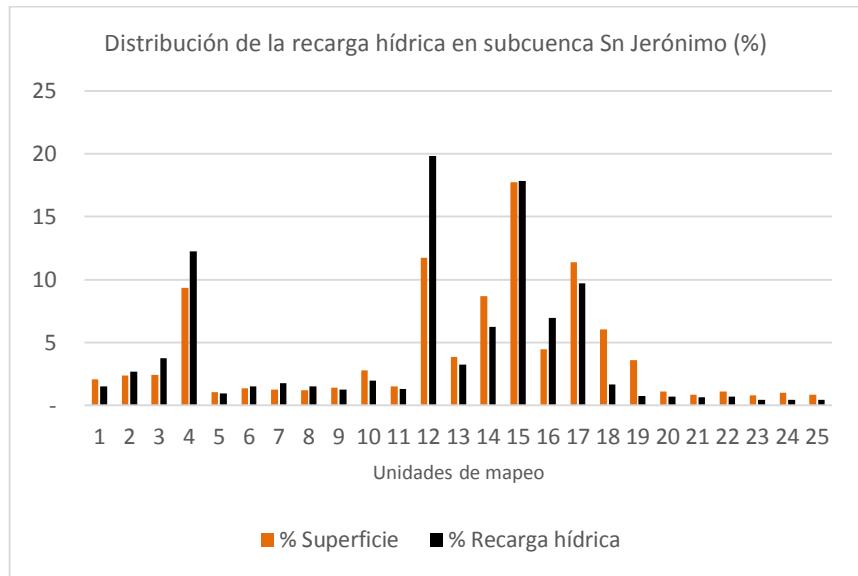
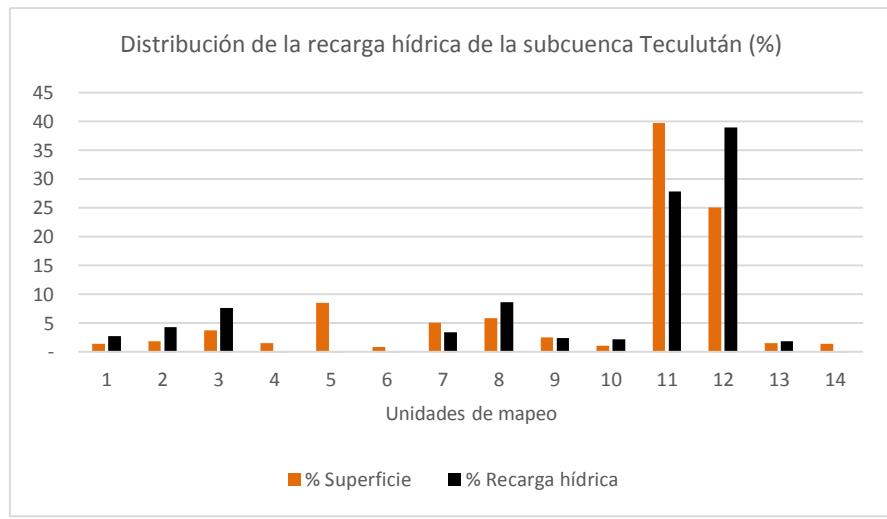
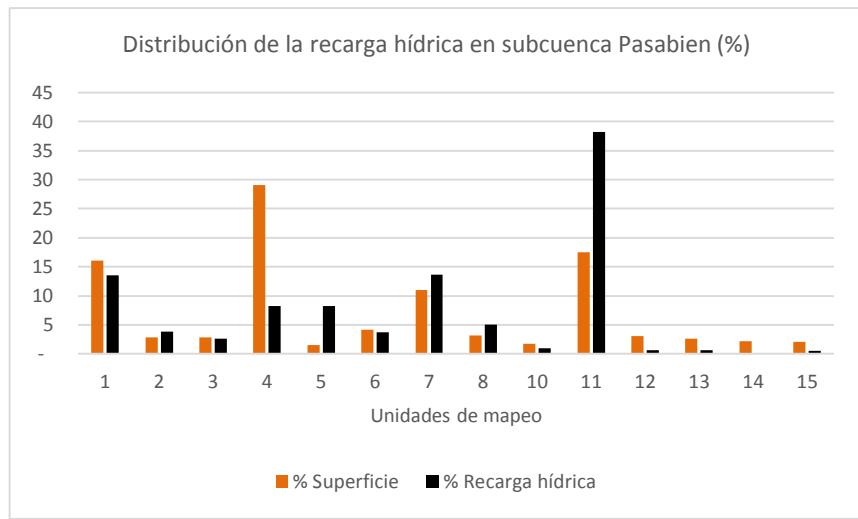


Figura 4. Análisis comparativo entre % de superficie y % de recarga hídrica por cada unidad de mapeo (UM) en las subcuenca estudiadas

Cuadro 8. Datos hídricos y descriptores biofísicos de las unidades de mapeo con mayor recarga hídrica de las cuatro subcuencas

Subcuenca	Unidad de Mapeo	% Superficie	% Recarga hídrica	Lámina de recarga hídrica (mm)	Relación % de recarga hídrica / % superficie	Geología	Suelos predominantes	Cobertura predominante
Pasabien	5	2	7	3,871	4.8	Pzm	Eo	Bosque coníferas
	11	18	38	1,855	2.2	Pzm	Ls	Bosque latifoliado / mixto
	8	3	5	1,357	1.6	Pzm	Eo	Arbustos y matorrales
	Lámina promedio de recarga		851.					
Teculután	2	2	4	1,446	2.3	I	Ud	Arbustos y matorrales
	3	4	8	1,272	2.1	I	Ls	Arbustos y matorrales
	10	1	2	1,271	2.1	Pzm	Ud	Bosque latifoliado
	Lámina promedio de recarga		611					
San Jerónimo	12	12	20	986	1.7	Pzm	Ud	Bosque latifoliado
	16	4	7	904	1.6	Pzm	Ls	Bosque latifoliado
	3	2	4	904	1.5	Pi	Ud	Bosque latifoliado
	Lámina promedio de recarga		575					
Pueblo Viejo	5	5	8	3,410	1.5	CPsr	Ud	Bosque latifoliado / mixto
	9	5	7	3,092	1.4	CPsr	Ud	Cardamomo
	14	41	47	2,665	1.2	Pzm	Ud	Bosque latifoliado/mixto
	Lámina promedio de recarga		2,204.					

Descripción abreviaturas. Geología. Pzm: rocas ígneas y metamórficas del Paleozóico, filitas, esquistos, migmatitas, etc; I: rocas ígneas y metamórficas del terciario, granitos, dionitas, etc; Pi: rocas ultrabásicas de edad desconocida, predominantemente serpentinitas; CPsr: Rocas sedimentarias del periodo Carbonífero Pérmico, se caracteriza por el grupo Santa Rosa (lilitas, areniscas, conglomerados y filitas). **Suelos predominantes:** Eo: Orden Entisol, suborden Orthents; Ls: orden Alfisol, suborden Ustalfs; Ud: Orden Itisoles suborden Udult. (para mayor información ver Capítulo II)

4.2 Clasificación de las zonas de recarga hídrica e implicaciones en la zonificación de la RBSM.

Derivado de la generación balances hídricos para cada Unidad de mapeo (UM) se procedió a clasificarlas, de acuerdo a su lámina de recarga hídrica (Figura 5 y 6). Se puede apreciar que la distribución proporcional de las zonas de categoría alta (entre 575 y 862 mm) y muy alta (mayores a 862 mm) es desigual, de acuerdo a la región hidrológica en donde se ubican.

En la región de sotavento se presentan estas zonas concentradas en la parte alta de las subcuenca respectivas (Pasabien y Tecolután) en proporciones cercanas al 25%. En tal sentido se puede estimar que la zona núcleo de conservación de la RBSM representa un promedio de recarga mayor a 1,000 m³/ha. En términos del servicio de captación hidrológica esta zonificación se puede considerar adecuada (Figura 5).

En la región de barlovento, es decir en la subcuenca Pueblo Viejo, las categorías de alta y muy alta recarga hídrica abarcan cerca del 90% de la subcuenca. De manera contrastante en San Jerónimo, no se presentan zonas con muy alta recarga hídrica sino una estrecha zona de categoría alta ubicada en la parte alta de la misma y otras zonas relativamente pequeñas esparcidas (Figura 6).

Sin embargo para la región hidrológica de transición, la subcuenca Jerónimo (la que tiene las láminas de recarga hídrica más bajas, en un promedio cercano a 575 mm), presenta que una alta proporción de las zonas catalogadas de alta y muy alta recarga se encuentran en área núcleo de la RBSM. Es notorio que también se presentan fuera del área protegida. En tal sentido sería necesario establecer fuertes medidas de conservación también en estos sitios (Figura 5).

En la subcuenca de Pueblo Viejo, por el contrario a la anterior, una gran proporción de las zonas de alta y muy alta se encuentra fuera del área protegida.

Estos son criterios que pueden resultar útiles para la planificación del área protegida, incluso de la modificación de límites internos y externos, de acuerdo a los objetivos de creación de la misma. Es importante resaltar la importancia de la protección de la zona núcleo actualmente definida ya que coincide con las UM de mayor recarga hídrica con láminas que superan los 1000 mm al año.

Al analizar la distribución de estas categorías con la zonificación del área protegida de la RBSM se puede apreciar que para la región de sotavento es donde la conservación del área núcleo es aún más importante en términos de recarga hídrica.

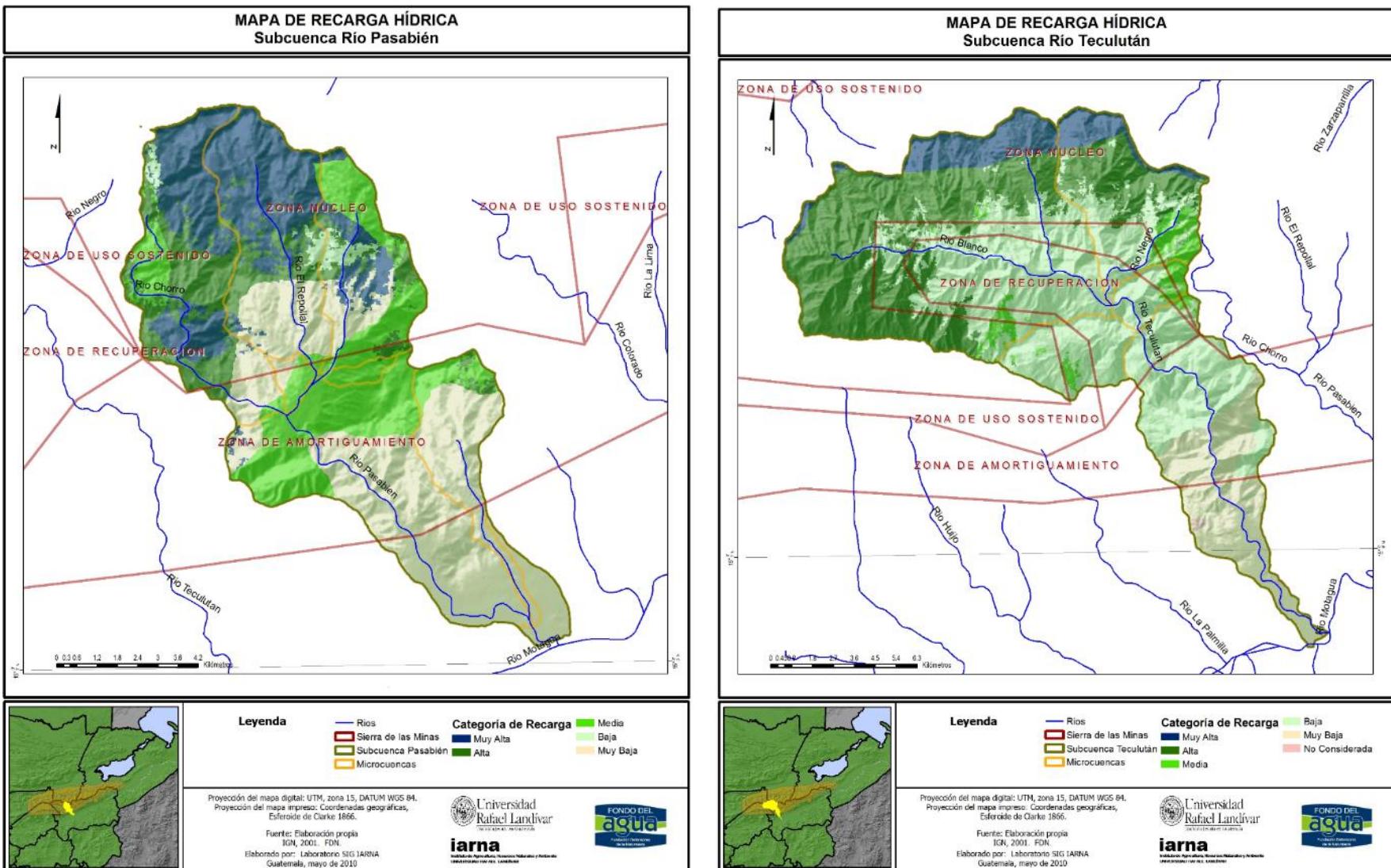


Figura 5. Clasificación de las zonas de recarga hídrica en las subcuenca de sotavento (colores sólidos identificados en la leyenda de cada mapa) y las zonas de conservación de la RBSM (líneas rosadas)

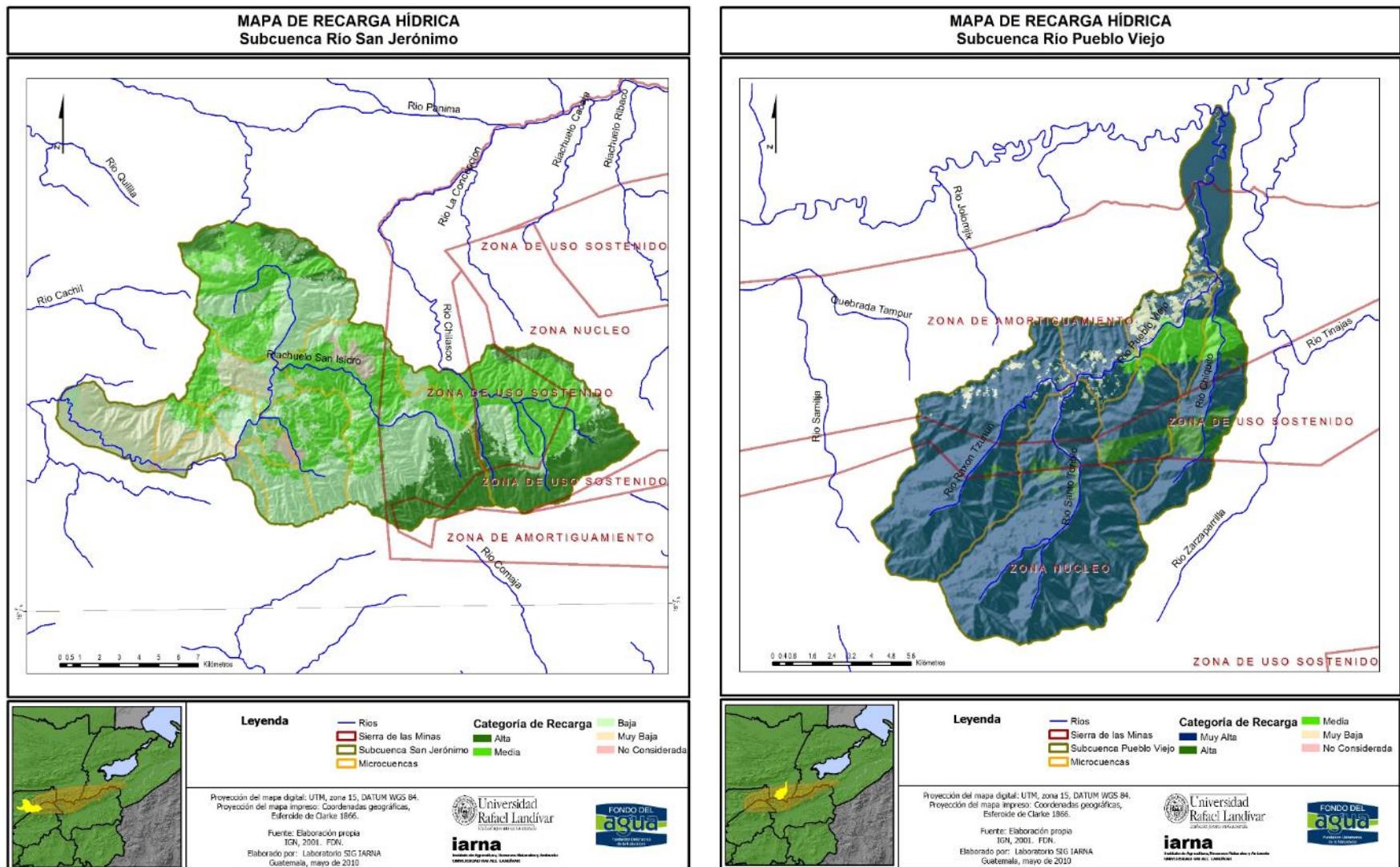


Figura 6. Clasificación de las zonas de recarga hídrica (colores sólidos identificados en la leyenda de cada mapa) en las subcuenca de las regiones hidrológicas de transición (izquierda) y de barlovento (derecha) y las zonas de conservación de la RBSM (líneas rosadas)

4.3 Análisis de la recarga hídrica a escala de microcuenca.

Se considera pertinente estudiar los resultados de recarga hídrica utilizando como unidad de análisis las microcuenca. Esto obedece a que estas conceptualmente son unidades territoriales muy útiles para evaluar la respuesta hidrológica, para efectos de gestión son rápidamente identificables en campo (característica que no cumplen las UM anteriormente descritas), y, además, resulta importante validar la utilidad práctica de la utilización de la propuesta cartográfica emanada de las instituciones que administran recursos naturales en Guatemala y que es de uso común y accesible.

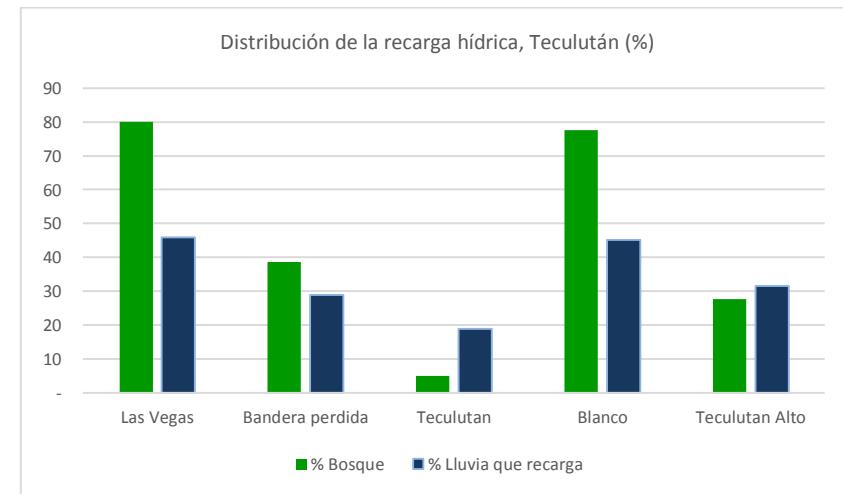
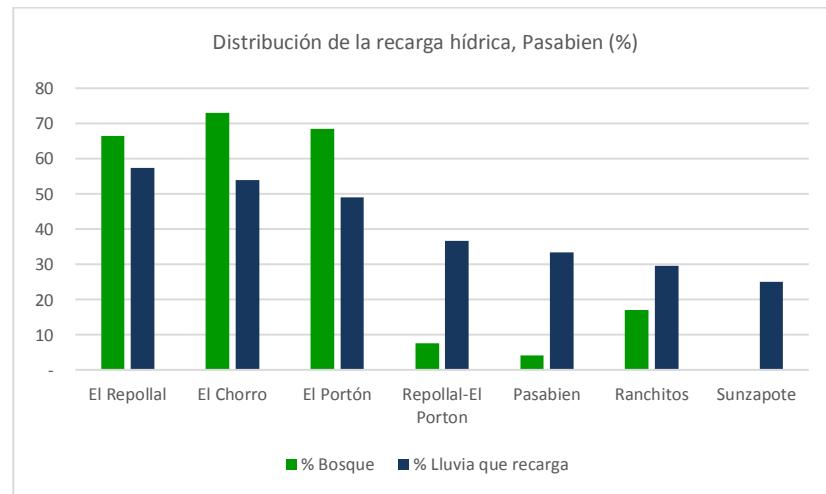
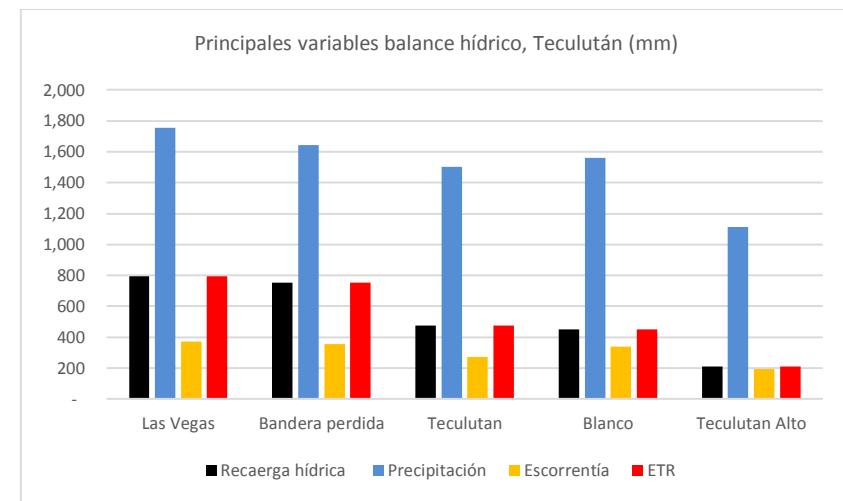
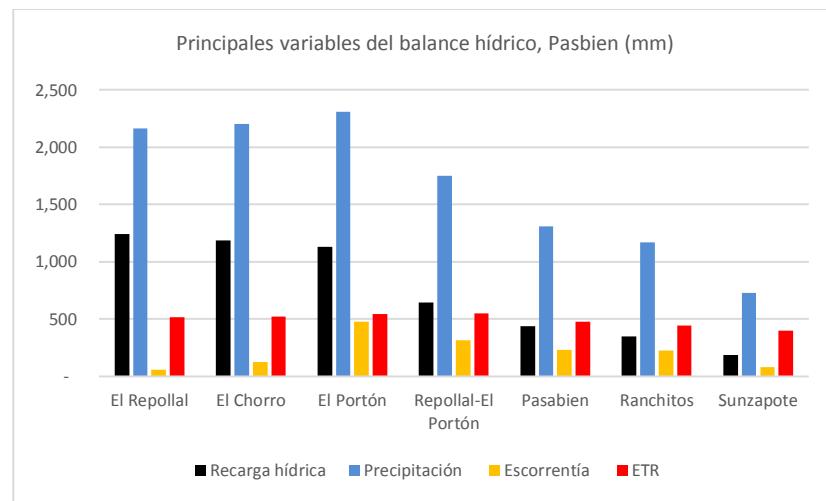
Para el análisis de las principales variables relacionadas con el balance hídrico se elaboraron gráficos que las describen (Figuras 7 y 8). En la Figura 7 se pueden apreciar cuatro gráficos que describen las principales variables hidrológicas de las subcuenca de sotavento. Las dos superiores describen, para cada una de las microcuenca que conforman la subcuenca, la comparación entre las láminas (mm) de recarga hídrica y las de precipitación, escorrentía y ETR. Las gráficas inferiores describen, los porcentajes de la cobertura de bosque (barra verde) y la barra azul oscuro describe el porcentaje de lluvia que se transforma en recarga, ambas a escala de cada microcuenca. Lo anterior se considera útil para evidenciar que papel juega cada una de estas variables en la recarga.

Para el caso de Pasabien, se evidencia (en la gráfica superior) que la recarga hídrica (barra negra) no presenta relación evidente ni directa ni inversa con los valores para ETR ni con la escorrentía. La única variable relacionada es la precipitación. Y aprovechando la ilustración que ordena de mayor a menor la lámina de recarga hídrica es posible compararla con la gráfica inferior, de tal manera que se evidencia que dicha lámina de recarga tampoco se correlaciona con el porcentaje de cobertura de bosque, ni el porcentaje de lluvia que se convierte en recarga hídrica (Figura 7).

Es decir que la única variable que presenta algún grado de correlación con la recarga es la lámina de lluvia. De tal manera que las microcuenca ubicadas en la parte alta, vinculadas a las zonas de alta recarga hídrica, sobre todo en la región de sotavento son las que presentan mayor lámina de recarga hídrica. Este patrón se repite, en mayor o menor grado, para todas las subcuenca analizadas (Figuras 7 y 8).

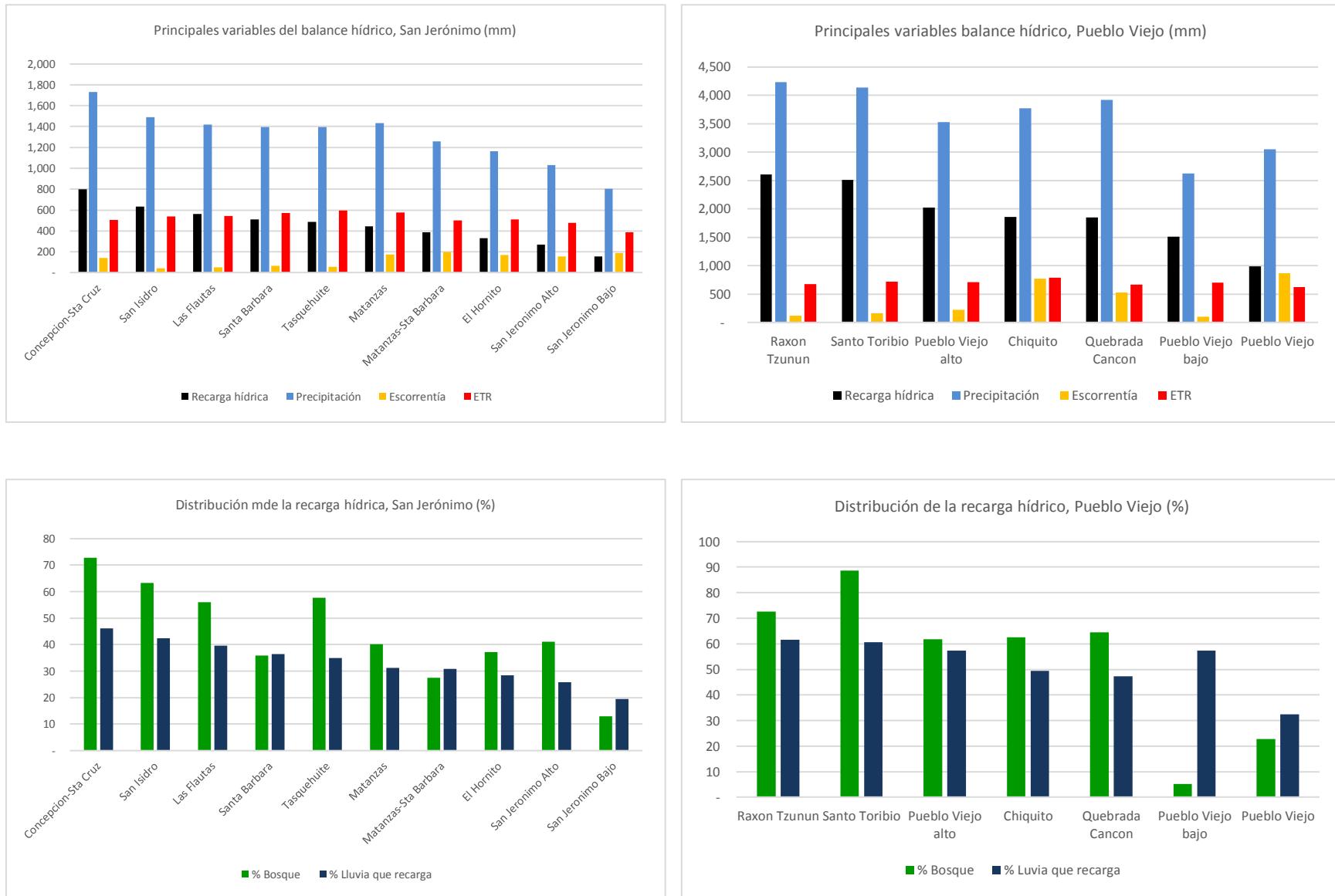
Otros datos que resaltan son: valores homogéneos para las ETR en las subcuenca, alrededor de 500 mm, excepto en Tecolután en donde existe un gradiente directamente proporcional al de las láminas de lluvia y de recarga hídrica, que presenta valores entre 700 y 150 mm. La escorrentía presenta valores muy poco homogéneos, los cuales están de cerca de 0 hasta cerca de 1000 mm. Contrario a lo esperable el porcentaje de cobertura boscosa no presenta una alta correlación con el porcentaje de lluvia que se convierte en recarga hídrica, especialmente para la región de sotavento.

Esto demuestra la poca correlación existente entre la presencia de bosque, tanto de la lámina de recarga hídrica como del porcentaje de lluvia que se convierte en recarga. Sería importante analizar con mayor profundidad otros aspectos como la pendiente, la cual la metodología de Schisinsky (al determinar factor pendiente K_p) no lo permite ya que deja un rango muy amplio aquellos sitios mayores a 6%, es decir, más del 95% de la superficie de la cuenca bajo una misma categoría. Sin embargo si se logran evidenciar las grandes diferencias existentes entre las regiones hidrológicas, así como de los gradientes altitudinales y climáticos de las subcuenca, especialmente verificable a través del análisis de las láminas de recarga y de precipitación.



Arriba: Comparación de láminas (mm) de recarga hídrica con láminas (mm) de precipitación, escorrentía y ETR para cada microcuenca.
 Abajo: Comparación entre porcentaje de bosque y porcentaje de lámina de lluvia que recarga para cada microcuenca.

Figura 7. Principales variables del balance hídrico de las subcuenca de sotavento (Pasabien y Teculután).



Arriba: Comparación de láminas (mm) de recarga hídrica con láminas (mm) de precipitación, escorrentía y ETR para cada microcuenca.
Abajo: Comparación entre porcentaje de bosque y porcentaje de lámina de lluvia que recarga para cada microcuenca.

Figura 8. Análisis comparativo de las principales variables del balance hídrico.

Para validar la relación existente entre la lámina de recarga y las láminas de precipitación y balance hídrico atmosférico, es decir, restándole la ETR a la precipitación, se elaboraron gráficos de dispersión de puntos (Figuras 9 y 10). Ambos gráficos evidencian la estrecha relación existente entre precipitación y recarga hídrica. En este sentido se infiere que para el área de estudio, este factor es el principal determinante de las condiciones necesarias para la recarga. Por ejemplo, la intemperización de los materiales parentales existentes (independientemente de su origen y características), el desarrollo de suelos, y consecuente formación de cobertura de vegetación natural, están subordinados a los procesos de intemperización de la lluvia.

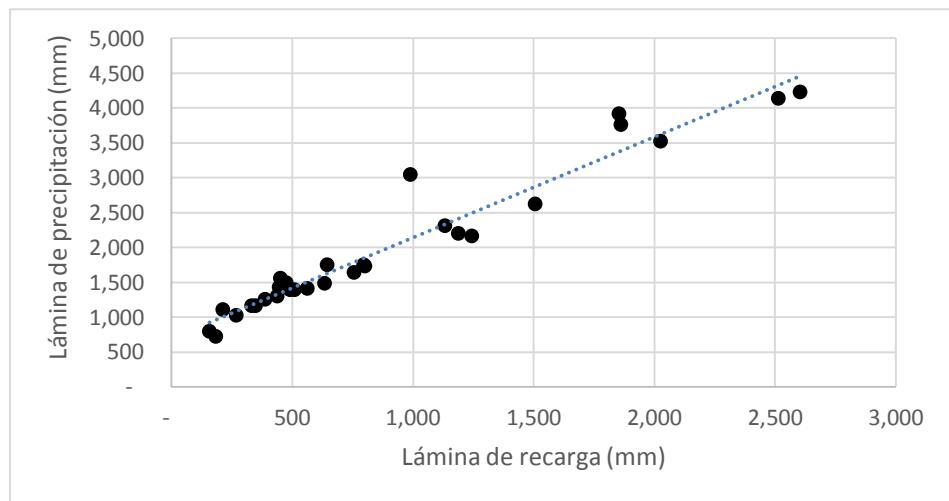


Figura 9. Relación entre lámina de recarga y lámina de precipitación de todas las microcuencas analizadas para las tres regiones hidrológicas (sotavento, barlovento y zona de transición)

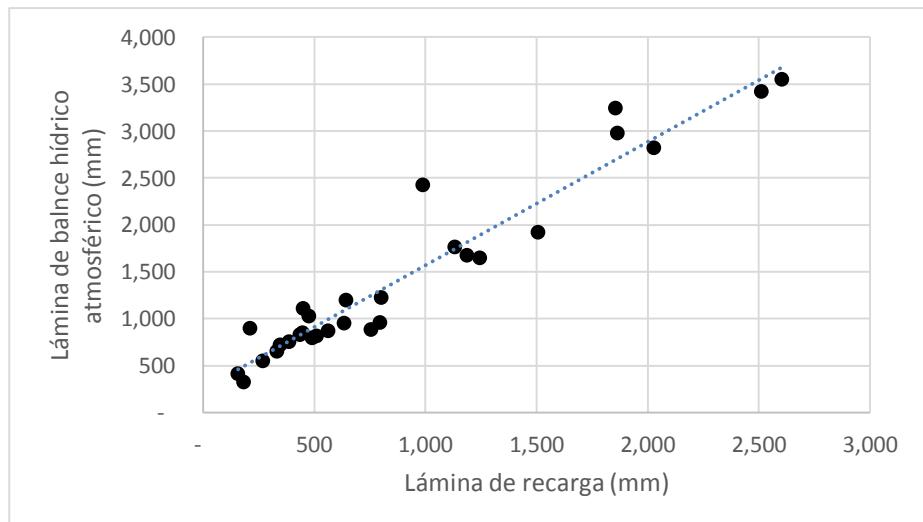


Figura 10. Relación entre lámina de recarga y lámina de balance hídrico atmosférico (precipitación – ETR) de todas las microcuencas analizadas para las tres regiones hidrológicas (sotavento, barlovento y zona de transición)

5 Conclusiones

Se evidenciaron grandes diferencias entre las tres regiones hidrológicas definidas para la RBSM. Las subcuenas de sotavento, Pasabien y Teculután, aunque manifiestan diferencias, tienen hidrología y rendimiento hídrico similar. Las láminas de precipitación entre 1500 y 1800, de recarga hídrica de entre 600 y 850 mm y una disponibilidad hídrica (recarga hídrica más escorrentía) promedio de cerca del 58% de la lluvia. Se evidenció recargas contrastantes entre la parte alta (cerca de 3,000 mm) y baja (cerca de 0) de las subcuenas.

La subcuenca de la región hidrológica de transición, San Jerónimo, presenta valores relativamente bajos en cuanto a lámina de recarga hídrica, de 576 mm. Esto obedece a láminas relativamente bajas de precipitación anual, cercanos a 1450 mm y una lámina de ETR relativamente alta de 525 mm, equivalente al 40% (la más alta de las regiones hidrológicas evaluadas). La subcuenca presenta una disponibilidad hídrica, también la más evaluada, de cerca de 675 mm (47% de la lluvia total).

La subcuenca Pueblo Viejo ubicada en barlovento tiene una lámina de precipitación promedio de cerca de 3,800 mm y una lámina mayor a 2000 mm de recarga. Son tan altos sus valores de recarga hídrica, que en términos generales, en esta región triplican la lámina de recarga en relación a sotavento y es cuatro veces mayor a la de la región de transición. Se evidenció láminas de recarga muy homogéneas en las diferentes partes de la subcuenca.

La recarga hídrica muestra alta correlación con la lámina de lluvia anual. Sin embargo muestra baja correlación con la presencia de bosque. Las unidades con valores más altos de recarga hídrica anual están de diversidad de geologías, suelos y tipos de cobertura del suelo. Sin embargo destacan conspicuamente los valores de recarga en estratos geológico de rocas calizas del cuaternario.

Se puede inferir que la zona núcleo de la RBSM recarga un promedio superior a 1,000 mm de lámina anual (equivalente 10,000 m³/ha), llegando a valores cercanos a los 3,000 mm.

El método empleado, propuesto por Schosinsky, se considera muy adecuado y pertinente para el análisis de los balances hídricos con énfasis en la recarga hídrica natural. El uso de la cartografía de microcuenca propuesta por las instituciones de Guatemala se considera pertinente para el estudio de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica a escalas de microcuenca y subcuenca, es decir estudios locales y regionales. Los métodos de análisis empleados fueron muy útiles y adecuados para la comprensión de regiones hidrológicas contrastantes como las que se presentan en la RBSM

6 Bibliografía

- Adger, N. (2003). Social Capital, Collective Action, and Adaptation to Climate Change. *Economic Geography*, 79(4), 387-404.
- Adger, N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(1), 268–281.
- Adger, N., & Vincent, K. (2005). External Geophysics, Climate and Environment. Uncertainty in adaptive capacity. *C.R. Geoscience*, 337, 399–410.
- Adger, N., Arnel, N., & Tompkins, E. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15, 77-86.
- Adger, N., Huq, S., Brown, K., Conway, D., & Hulme, M. (2003). Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in Development Studies* 3,3 (2003) pp. 179–195, 179-195.
- Adger, N., Huq, S., Brown, K., Conway, D., & Hulme, M. (2012). Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in development studies*, 47, 47-55.
- Agrawala, S. (2003). Climate Change and Development. *IDS Bulletin* 35.3, 35(3), 51-59.
- Alianza para la Conservación de los Bosques de Pino-Encino de Mesoamérica. (2008). *Plan de conservación de los bosques de pino-encino de Centroamérica y el ave migratoria dendroica chrysoparia*. (C. Pérez, E. Secaira, & S. Macías, Edits.) Guatemala: Fundación Defensores de la Naturaleza.
- Andrade, G. I., Sandino, J. C., & Aldana-Domínguez, J. (2011). *Biodiversidad y territorio innovación para la gestión adaptativa frente al cambio global. Insumos técnicos para el plan de acción nacional para la gestión integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos*. Bogotá: Instituto Humboldt, Colombia.
- Aronson, R. (2009). Overview - Climate Change and Adaptation. *Sustainability 2009: The Next Horizon*, edited by G. L. Nelson and I. Hronszyk, 1-10.
- Ayers, J., & Dodman, D. (2010). Climate change adaptation and development I: the state of the debate. *Progress in Development Studies* 1, 10(2), 161-168.
- Beg, N., Morlot, J. C., Davidson, O., Afrane-Okesse, Y., Tyani, L., Denton, F., . . . Rahman, A. A. (2002). Linkages between climate change and sustainable development. *Climate Policy*, 2, 129-144.
- Bird Species and Climate Change: The Global Status Report version 1.0. (2007). *A Climate Risk Report The Global Status Report: A synthesis of current scientific understanding of anthropogenic climate change impacts on global bird species now, and projected future effects*.
- Bowen, A., Cochrane, S., & Fankhauser, S. (2012). Climate change, adaptation and economic growth. *Climatic Change*, 113, 95–106.
- Braat , L., & Groot, R. (2012). The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. *Ecosystem Services*, 4-15.

- Brooks, N., Grist, N., & Brown, K. (2009). Development Futures in the Context of Climate Change: Challenging the Present and Learning from the past. *Development Policy Review*, 27(6), 741-765.
- Burkharda, B., de Groot, R., Constanza, R., Seppelt, R., Jorensen, S., & Potschin, M. (2012). Editorial: Solutions for sustaining natural capital and ecosystem services. *Ecological Indicators*, 21, 1-6.
- Burton, I., Huq, S., Lim, B., Pilifosova, O., & Schipper, E. L. (2002). From impacts assessment to adaptation priorities:the shaping of adaptation policy. *Climate Policy*, 2, 145–159.
- CATIE. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica*. Turrialba: CATIE-ASDI.
- Chen, X., Zhang, X.-S., & Li, B.-L. (2003). The possible response of life zones in China under global climate change. *Global and planetary change*, 38, 327–337.
- Collier, B., & al., e. (2012). Predicting patch occupancy in fragmented landscapes at the rangewide scale for an endangered species, an example of an American wrbler. *Diversity and Distribution*, 18, 158–167.
- Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América . (2000). *Evaluación de Recursos de agua de Guatemala*. Mobile: United States Southern Command.
- Custodio, & Llamas. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona : Omega.
- de Groot, R. S., Alkemade, S., Braat, L., Hein, L., & Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological complexity*, 267-272.
- de Groot, R., Alkemade, R., Braat , L., Hein, L., & Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 7, 260-272.
- Fankhauser, S., Smith, J., & Tol, R. (1999). Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions. *Ecological economics*, 30, 67-78.
- Fisher, G., Shah, M., Tubiello, F., & Vehluizen, F. (Gu“nther Fischer1,* Mahendra Shah1, Francesco N. Tubiello1,2 de 2005). Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. *Philosophical transactions, Royal Society* 360, 360, 2067–2083.
- Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16, 253-267.
- Gallopin, G. (2006). *Los aspectos del desarrollo sostenible: Aspectos conceptuales y metodológicos*. Santiago, Chile: CEPAL.
- Gallopin, G. (2006). *Sostenibilidad del Desarrollo en América Latina y el Caribe: cifras y tendencias en Honduras*. Santiago, Chile: CEPAL, Nacione Unidas.

- Gordillo , C. (2010). *Situación actual y directrices para el manejo de tierras forestales de muy alta, alta y media captación y regulación hidrológica de Guatemala*. Guatemala: URL.
- Groot, R., Wilson, M., & Boumans, R. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* , 41, 393–408.
- GTZ. (2006). *Bases Conceptuales y Metodológicas para la Elaboración de una Guía Nacional de Ordenamiento Territorial* . Lima, Perú: GTZ.
- Hargreaves, & Samani. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Transactio of ASAЕ*, 96-99.
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). *International Journal of Climatology*(25), 1965–1978.
- Hijmans, T., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 25, 1965–1978.
- Holdridge. (1971). *Ecología basada en Zonas de Vida*. Turrialba: ICTA.
- IARNA. (2009). *Evaluación de la sostenibilidad del desarrollo en Guatemala*. Guatemala: IARNA.
- IARNA/BANGUAT. (2009). *El sistema de contabilidad ambiental y económica integrada*. Guatemala: IARNA.
- IARNA-URL (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landivar). (2011). *Cambio climático y biodiversidad. Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico*. Guatemala 97, Guatemala : IARNA.
- IARNA-URL. (2005). *Situación del Recurso Hídrico en Guatemala. Documento Técnico del Perfil Ambiental* . Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landivar.
- IARNA-URL. (2010). *Perfil ambiental de Guatemala*. Guatemala : IARNA.
- IARNA-URL. (2012). *Perfil ambiental de Guatemala* . Guatemala : IARNA URL.
- INAB-FAUSAC (2003). Metodología para la determinación de áreas de recarga hídrica. Guatemala. Instituto nacional de Bosques.
- INSIVUMEH. (2001). *Cuantificación del recursos hídrico*. Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología .
- Instituto Nacional de Bosques. Guatemala. (2003). *Metodología para la determinaciÓn de áreas críticas de recarga hídrica natural. Manual Técnico*. Guatemala: INAB.

- IPCC. (2000). *Escenarios de emisiones. Reporte especial del IPCC. Resumen para responsables de políticas*. New York: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (2001). Cambio Climático 2001: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes del grupo de trabajo II. En I. P. Climático., *Resumen para responsables de políticas Tercer Informe de Evaluación*. (pág. 80). Geneva, Switzerland: IPCC Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
- Jerneck, A., & Lenart, O. (2008). Adaptation and the poor: development, resilience and transition. *Climate Policy*, 8(2), 25-29.
- Jimenez, M. (2009). *Resiliencia de los ecosistemas naturales terrestres de Costa Rica al cambio climático*. Turrialba, Costa Rica : CATIE.
- King, D., Chandler, C., Rappole, J., Chandler, R., & Melham, D. (2012). Establishing quantitative habitat targets for a 'Critically Endangered' Neotropical migrant (Golden-cheeked Warbler *Dendroica chrysoparia*) during the non-breeding season. *Bird Conservation International*, 22(2), 213-221.
- Komar, O., McCrary, J., Van Dort, J., Cobar, A., & Castillejo, E. (2011). *Winter ecology, relative abundance and population monitoring of Golden-cheeked Warblers (Dendroica chrysoparia) throughout the known and potential winter range. Draft final report*. Chiapas: Salvanatura.
- Lagerroos, D. (2004). Sustainability seen through an integral lens. *World Futures*, 60, 319-325.
- Laukkonen, J., Kim Blanco, P., Lenhart, J., Keiner, M., Cavric, B., & Kinuthia-Njenga, C. (2009). Combining climate change adaptation and mitigation measures at the local level. *Habitat International*, 33 , 287-292.
- Lindsay, D. (2008). Habitat fragmentation and genetic diversity of an endangered, migratory songbird, the golden-cheeked warbler (*Dendroica chrysoparia*). *Molecular Ecology*, 17, 2122–2133.
- Lugo, A. E., Brown, S. L., Dodson, R., & Smith, T. S. (1999). The Holdridge life zones of the conterminous United States in relation to ecosystem mapping. *Journal of Biogeography*, 1025-1038.
- Lyons, J. (1990). *Winter habitat survey of the Golden-cheeked Warbler (Dendroica chrysoparia) in Guatemala*. Washington.
- MDG Achievement Fund. (2010). *Metodología para el análisis de vulnerabilidad al cambio y a la variabilidad climática aplicada a un área piloto*. Bogotá, Colombia: MDG Achievement Fund.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005.). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington DC: Island Press.
- Mundial, B. (2010). *Grupo del Banco Mundial*. Recuperado el 02 de noviembre de 2012, de <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/BANCOMUNDIAL>

- Naciones Unidas. (2009). *Riesgo y pobreza en un clima cambiante*. Geneva: Naciones Unidas.
- Oudenhoven, A., Petza, K., Alkemadeb, R., Heina, L., & de Groot, R. (2012). Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. *Ecological Indicators*, 21, 110-122.
- PNUD. (2011). *Programa de informes nacionales de desarrollo humano y de objetivos de desarrollo del milenio*. Recuperado el 02 de noviembre de 2011, de <http://desarrollohumano.org.gt/content/idh-en-guatemala>
- Pringle, C. (2001). Hydrological connectivity and management of biological reserves: a global perspective. *Ecological Applications*, 4, 981–998.
- Quay, R. (2010). Anticipatory Governance. A tool for climate change adaptation. *Journal of the American Planning Association*, 476(4), 496-511.
- Rappole, J., King, D., & Leimgruber, P. (2000). Winter habitat and distribution of the endangered golden-cheeked warbler (*Dendroica chrysoparia*). *Birdlife*, 201-210.
- Renault Adib, A. (2010). *Guía para la formulación y gestión de planes de desarrollo rural sostenible. Un abordaje participativo con énfasis en territorio*. Asunción, Paraguay: IICA.
- Rosito, J., & Rodas, O. (2005). *Programa de investigación de hidrología forestal*. Guatemala : INAB.
- Rottach, P. (2011). *Antecedentes y componentes de la Reducción del riesgo a desastres*. Alemania: Diakonie Katastrophenhilfe.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial mediante el balance hídrico de suelos. *Revista geológica de América Central*, 13-30.
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). Modelo analítico para la determinación de la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*(23), 43-55.
- Schuschny, A., & Soto, H. (2009). *Guía metodológica. Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible*. Santiago, Chile: CEPAL.
- Secretaría de ambiente y desarrollo sostenible . (2006). *Sistema de indicadores de desarrollo sostenible: República de Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Secretaría de ambiente y desarrollo sostenible de Argentina.
- SEMARNAT. (2011). *Identificación de reservas de agua potenciales para el medio ambiente en México*. Distrito Federal de México: SEMARNAT-WWF.
- SMEC Australia. (2007). *Climate change adaptation actions for local government* (Third ed.). Australia: Government of Australia.
- Turner, B., Kasperson, R., Matson, P., McCarthy, J., Corell, R., Christensen, L., . . . Kasperson, J. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. (PNAS, Ed.) *PNAS*, 100(14), 8074-8078.

- UNDP. (2002). *An adaptation policy framework. Capacity building for stage II adaptation.* New York: UNDP-GEF.
- UNFCCC. (2007). *Impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries.* Bonn, Germany: UNFCCC.
- USAID-MAGA. (2012). *Evaluación del potencial de aguas subterráneas de la República de Guatemala a escala de reconocimiento (1:250,000), como apoyo al desarrollo del riego agrícola en comunidades de pequeños y medianos productores .* Guatemala : USAID-MAGA.
- Vidal, R., Macías-Caballero, C., & Duncan, C. (1994). The occurrence and ecology of golden-cheeked warbler in the northern highlands of Chiapas, México. *Condor*, 96(3), 484-491.
- WMO. (2006). *Technical regulations: Hydrology.* New York: World Meteorological Organization .
- WMO. (2012). *El Tiempo el Clima y el Agua.* Gineva : OMM.
- Woodward, F., & Beerling, D. (1997). The dynamics of the vegetation change: health warnings for equilibrium 'dodo' models. *Global Ecology Biogeography Letters*, 6, 413–418, 413 - 418.

7 Anexos

7.1 Determinación de la Infiltración Básica.

Se utilizó el método de Porchet o cilindro excavado, el cual es un método preciso y versátil en el campo (Custodio y Llamas, 2001), se conoce también con el nombre de cilindro excavado en el suelo y consiste en excavar en el suelo un agujero cilíndrico con un radio R, el cual se llena de agua hasta una altura h y medir un cambio en el tiempo (dt) para suponer la capacidad de infiltración (f) en ese intervalo como constante.

FOTO 1. Elaboración del agujero en el suelo con barreno para elaborar prueba de infiltración.



FUENTE: INAB-FAUSAC, 2003.

Por lo tanto la superficie por la cual se filtra el agua es:

$$S = \pi R (2h + R) \text{ (INAB - FAUSAC, 2003)}$$

Para un tiempo, dt, suficientemente pequeño para que pueda suponerse constante la capacidad de infiltración, f, se verificará la igualdad:

$$\pi R (2h + R) f = R^2 (dh/dt) \text{ (INAB - FAUSAC, 2003)}$$

Separando variables obtenemos la ecuación diferencial:

$$fdt = - R (dh/(2h+R)) \text{ (INAB - FAUSAC, 2003)}$$

Al integrar resulta:

$$f = (R/2(t_2-t_1)) * \ln ((2h_1 + R) / (2h_2 + R)) \text{ (INAB - FAUSAC, 2003)}$$

Entonces para determinar f , basta medir pares de valores (h = altura de la columna de agua del cilindro cavado en el suelo, t = intervalo de tiempo); (h_1, t_1) , (h_2, t_2) , de forma que t_2 y t_1 no difieran demasiado y entrar con ellos en la expresión dada.

El procedimiento para la realización de la prueba consiste en limpiar, el área hacer el agujero con un barreno, de una altura h ; agregar agua en el hasta alcanzar humedad cercana al punto de saturación del suelo, luego colocando nivel de referencia para la toma de las profundidades, aplicar agua y se toman los datos h y t , a intervalos pequeños (a cada minuto).

FOTO 2: Medición del desplazamiento de la columna de agua (h) en un tiempo determinado (minutos), durante la prueba de infiltración.



FUENTE: INAB-FAUSAC, 2003.

7.2 Determinación de las Unidades de Mapeo de la subcuenca Teculután

A continuación se presenta la metodología empleada para la delimitación de Unidades de Mapeo (UM) de la subcuenca Teculután, la cual es uniforme para las cuatro subcuencas evaluadas en esta Tesis.

Descripción general de la Subcuenca Teculután.

La subcuenca del río Teculután se ubica en el departamento de Zacapa, entre coordenadas Latitudes N 15.165° y 14.963° y Longitudes O 89.919° y 89.7°, se ubica hidrológicamente en la cuenca del río Motagua. La subcuenca tiene una extensión de 20,102 hectáreas. Los ríos principales tienen una longitud de 46,698 metros (46.698 km), con una densidad de drenaje de 0.23 km/km².

A continuación se presentan la descripción de las tres principales variables que definen la recarga hídrica, la variación entre la extensión de cada variable temática se debe a los efectos de borde, así como los procesos de corte, unión e intersección al utilizar las capas temáticas a diferentes escalas en los sistemas de información geográfica.

Geología.

La subcuenca Teculután tiene dos tipos geológicos principales: la parte baja presenta aluviones del Cuaternario (Qa) y la parte alta y media de la cuenca tiene rocas ígneas y metamórficas del Paleozoico (Pzm) (SIG - MAGA 2,001). La escala de este estudio es 1:500,000.

1. Rocas ígneas y metamórficas del terciario (I).

Rocas plutónicas sin dividir incluye granitos y dionitas de edad pre-Pérmico, Cretácito y Terciario, esta unidad geológica cubre un 5.83% de la subcuenca, equivalente a 1,162.65 hectáreas.

2. Rocas ígneas y metamórficas del terciario (Pi).

Rocas ultrabásicas de edad desconocida, predominantemente serpentinitas, en parte del pre-Mestrichtrano en edad, dentro de la subcuenca solamente se extiende 37.82 hectáreas que representa un 0.19%.

3. Rocas ígneas y metamórficas del Paleozoico (Pzm).

Cubren una extensión de 18,429.83 hectáreas, que equivalen al 92.42% de la superficie total de la subcuenca, estas rocas metamórficas sin dividir presentan características como: filitas, esquistos cloróticos y granatíferos, esquistos y gneisses de cuarzo – mica – feldespato, mármol y migmatitas.

4. Aluviones del Cuaternario (Qa).

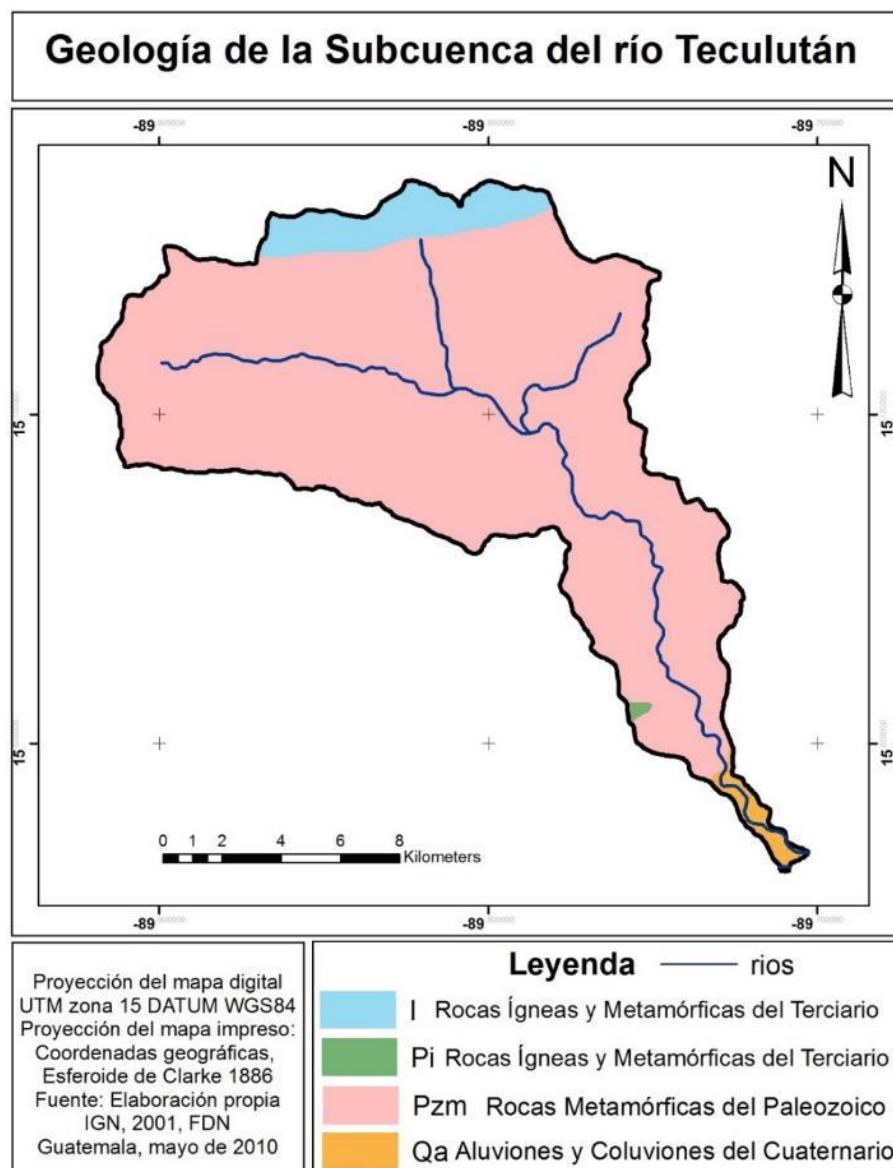
Geología formada por rocas sedimentarias, estos materiales han sido depositados por acción de las aguas de los ríos. En la subcuenca los aluviones cuaternarios constituyen un

1.56%, con una extensión de 311.42 hectáreas. El Cuadro 1 y Mapa 1 describe la distribución geográfica de las diferentes unidades geológicas presentes en la subcuenca.

Cuadro 1. Unidades geológicas de la subcuenca del río Pasabien.

No.	Símbolo	Geología	Area Ha	Area %
1	I	Rocas ígneas y metamórficas del Terciario	1,162.65	5.83
2	Pi	Rocas ígneas y metamórficas del Terciario	37.82	0.19
3	Pzm	Rocas metamórficas del Paleozoico	18,429.83	92.42
4	Qa	Aluviones y coluviones del Cuaternario	311.42	1.56
			Total	19,941.72
				100.00

Mapa 1. Geología de la subcuenca del río Pasabien.



Taxonomía de suelos.

De acuerdo a la primera aproximación al Mapa de Clasificación Taxonómica de los Suelos de la república de Guatemala, a escala 1:250,000 por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, la subcuenca tiene presente los órdenes Alfisoles, Entisoles, Inceptisoles y Ultisoles.

1. Orden Alfisol (alf).

Suelos con un horizonte interno que tiene altos contenidos de arcilla con relación a los horizontes superficiales, además presentan alta saturación de bases (mayor de 35%). Son suelos maduros con un grado de desarrollo avanzado, pero que todavía tienen un alto contenido de bases en los horizontes interiores. Generalmente son suelos con buen potencial de fertilidad.

a. Suborden Ustalfs (Ls).

Alfisoles que están secos entre 90 y 180 días del año en su interior, presentan déficit de humedad, ofrecen buenas condiciones para la producción agropecuaria, pero en caso de actividades agrícolas, se requiere de la suplementación de agua, para tener cultivos con más de una cosecha por año.

2. Orden Entisol (ent).

Suelos con poca o ninguna evidencia de desarrollo de su perfil y, por consiguiente, de los horizontes genéticos. El poco desarrollo es debido a condiciones extremas, tales como, el relieve (el cual incide en la erosión o, en su defecto, en la deposición superficial de materiales minerales y orgánicos) y, por otro lado, las condiciones como el exceso de agua. De acuerdo al relieve, estos suelos están presentes en áreas muy accidentadas (Cimas de montañas y volcanes) o en partes planas.

a. Suborden Fluventes (Ef).

Suelos no arenosos, con capas alternas de materiales orgánicos y minerales, generalmente están localizados en las proximidades de los ríos. Las pendientes más comunes son menores del 25 %. Para la producción agropecuaria, ofrecen muy buen potencial, salvo cuando tienen algunas limitantes, tales como pedregosidad externa, niveles freáticos superficiales o el agua es deficiente para cubrir las necesidades de las plantas.

b. Suborden Orthents (Eo).

Suelos de profundidad variable, la mayoría son poco o muy poco profundos. Generalmente están ubicados en áreas de fuerte pendiente, existen también en áreas de pendiente moderada a suave, en dónde se han originado a partir de deposiciones o coluviamientos gruesos y recientes. Una gran cantidad de Orthents en Guatemala, no son apropiados para actividades agrícolas, sobre todo cuando están en superficies inclinadas. Entre sus limitaciones están: la poca profundidad efectiva, en muchos casos la pedregosidad interna y los afloramientos rocosos. Si han perdido su cubierta natural, sus mejores usos serán para producción forestal o sistemas agroforestales.

c. Suborden Psamments (Ep).

Son los Entisoles más arenosos, que se encuentran en superficies poco inclinadas y con menos del 35% de fragmentos rocosos. Generalmente se encuentran en las áreas más cercanas a los ríos o en áreas de actividad volcánica muy reciente. No tienen capas deposicionales de materiales minerales en su interior. En muchas áreas, están cubiertos con bosque de galería, y en otros casos están cultivados y forman parte de lo que los agricultores llaman los suelos de vega. En los casos que se dispone de agua en abundancia pueden ser bastante productivos, puesto que tienen poca retención de humedad. La pedregosidad muchas veces es una limitante para la producción. Por su naturaleza arenosa, en muchos casos su contenido orgánico es muy bajo y su fertilidad se ve afectada.

3. Orden Inceptisol (ept).

Suelos incipientes o jóvenes, sin evidencia de fuerte desarrollo de sus horizontes, pero son más desarrollados que los entisoles. Son suelos muy abundantes en diferentes condiciones de clima y materiales originarios.

a. Suborden Udepts (Pd).

Inceptisoles que no están secos en su interior por más de 90 días. Tienen un adecuado contenido de humedad la mayor parte del año. Generalmente presentan buenas condiciones para actividades productivas, pero cuando se encuentran en regiones de alta pluviosidad, demandan reposición de nutrientes para hacerlos productivos.

b. Suborden Usteps (Ps).

Son inceptisoles que están secos en su interior, entre 90 y 180 días del año. Presentan deficiencia de humedad. Se les encuentra localizados en las regiones con menor lluvia. Para su manejo adecuado, requieren de la aplicación de agua para producción de más de una cosecha de cultivos anuales o de ciclo corto.

4. Orden Ultisol (ult).

Estos son suelos que normalmente presentan una elevada alteración de sus materiales minerales. Presentan un horizonte interior con alto contenido de arcilla (argílico) el cual tiene baja saturación bases (menor de 35%). La mayor parte de los ultisoles son suelos pobres debido al lavado que han sufrido. Por sus niveles de productividad que son muy bajos, demandan tecnologías no convencionales y ser manejados en forma extensiva, pero no con cultivos o actividades productivas exigentes en nutrientes.

a. Suborden Udult (Ud).

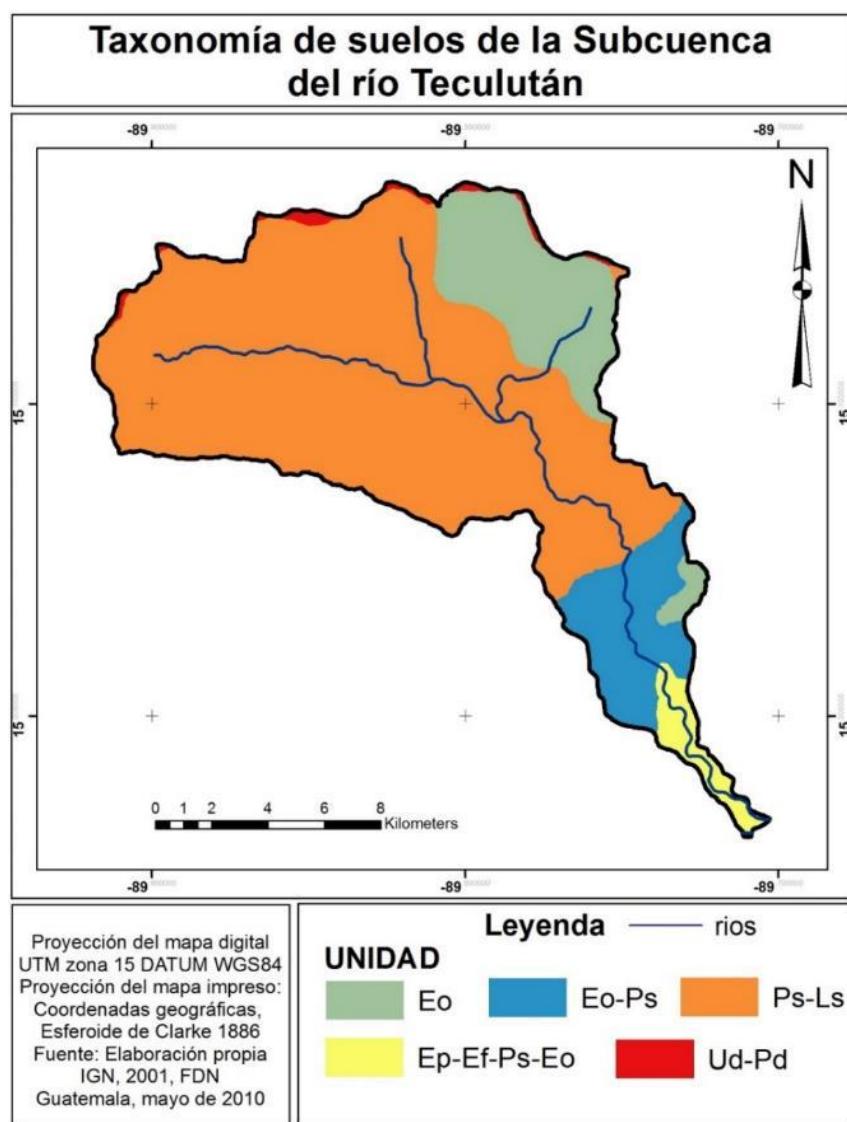
Suelos que están secos en su interior entre 90 y 180 días del año. Presentan déficit de humedad. Ud Manejando convenientemente su fertilidad natural y con técnicas adecuadas para controlar la erosión, pueden desarrollarse actividades productivas, siempre que sean de naturaleza extensiva.

A continuación se sintetiza la distribución geográfica de los suelos en la subcuenca (Cuadro 2 y Mapa 2)

Cuadro 2. Unidades taxonómicas de la subcuenca del río Teculután.

No.	Unidad de Suelos - Subórdenes	Área Ha	Área %
1	Eo	2,971.39	14.78
2	Eo Ps	1,980.59	9.85
3	Ep Ef Ps Eo	624.03	3.10
4	Ps Ls	14,258.71	70.93
5	Ud Pd	267.31	1.33
	Total	20,102.03	100.00

Mapa 2. Taxonomía de suelos de la subcuenca del río Teculutan.



El Cuadro 3 y Mapa 3 describen las categorías y su distribución geográfica de uso del suelo, esto de acuerdo a la Mapa de uso del suelo y cobertura vegetal publicado por el ministerio de Agricultura para el año 2003.

Cuadro 3. Uso del suelo y cobertura vegetal 2003 de la subcuenca del río Teculután.

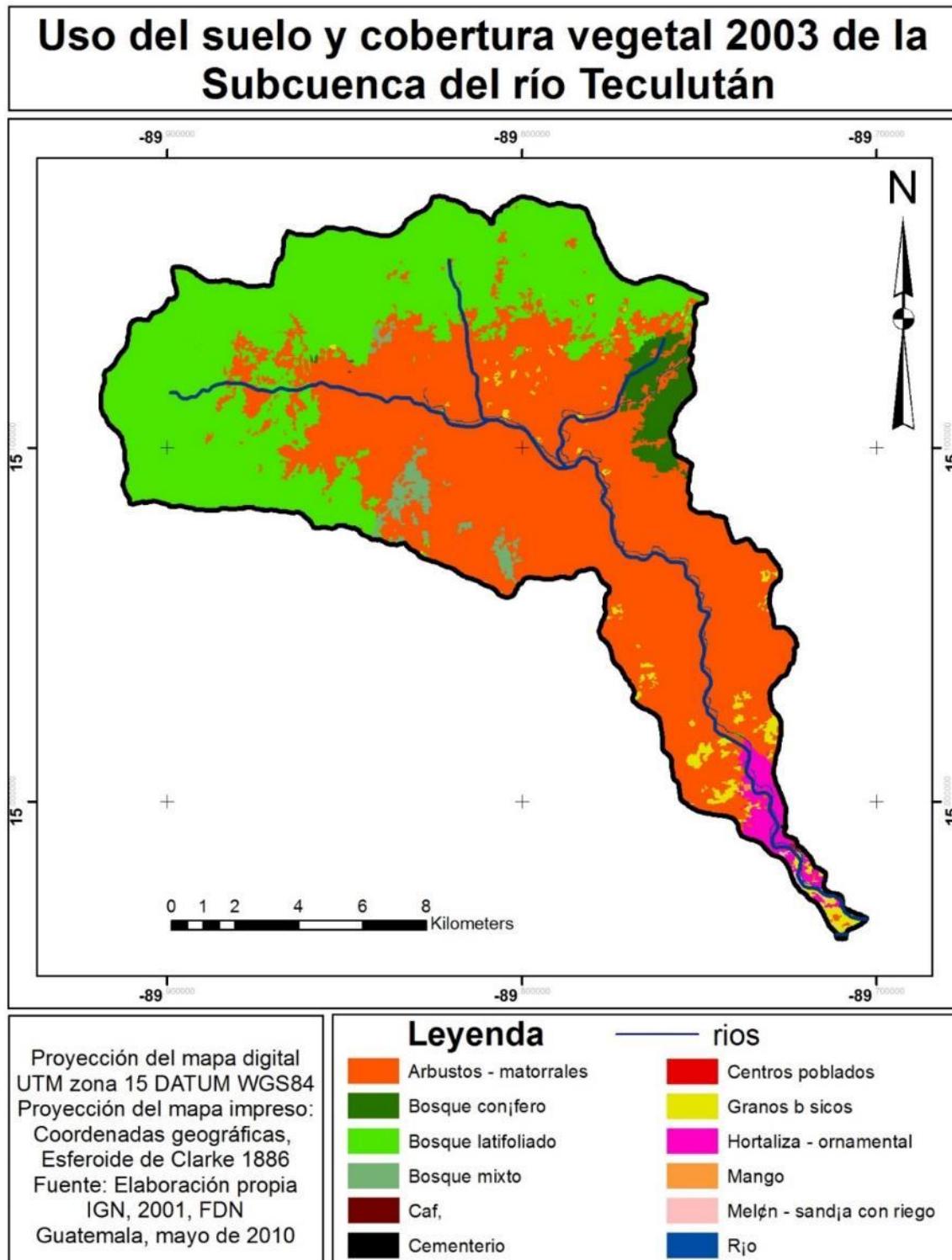
No.	Uso del Suelo y Cobertura 2003	Área Ha	Área %
1	Arbustos	10,733.51	53.36
2	Bosque Conífero	543.45	2.70
3	Bosque Latifoliado	7,667.42	38.12
4	Bosque Mixto	268.19	1.33
5	Café	1.31	0.01
6	Cementerio	1.19	0.01
7	Centros Poblados	4.53	0.02
8	Granos Básicos	368.73	1.83
9	Hortaliza - Ornamental	381.5	1.90
10	Mango	6.37	0.03
11	Melón o Sandía con riego	28.1	0.14
12	Río	110.59	0.55
	Total	20,114.89	100.00

Determinación de las Unidades de mapeo de las subcuenca Teculután.

El Cuadro 4 y Mapa 4 describen las Unidades de Mapeo (UM) definidas para la subcuenca Teculután, las cuales fueron generadas mediante un proceso, realizado con herramientas de sistemas de información geográfica, de intersección de los mapas de geología, taxonomía de suelos y cobertura del suelo.

En el Cuadro 4 aparecen algunas UM que a su vez presentan algunas subunidades. Estas subunidades fueron integradas en una sola por su tamaño y similitud de condiciones biofísicas. Esto fue importante metodológicamente para reducir las UM y hacer manejable su validación en campo, los muestreos de suelos, realización de pruebas de infiltración y el análisis de la información.

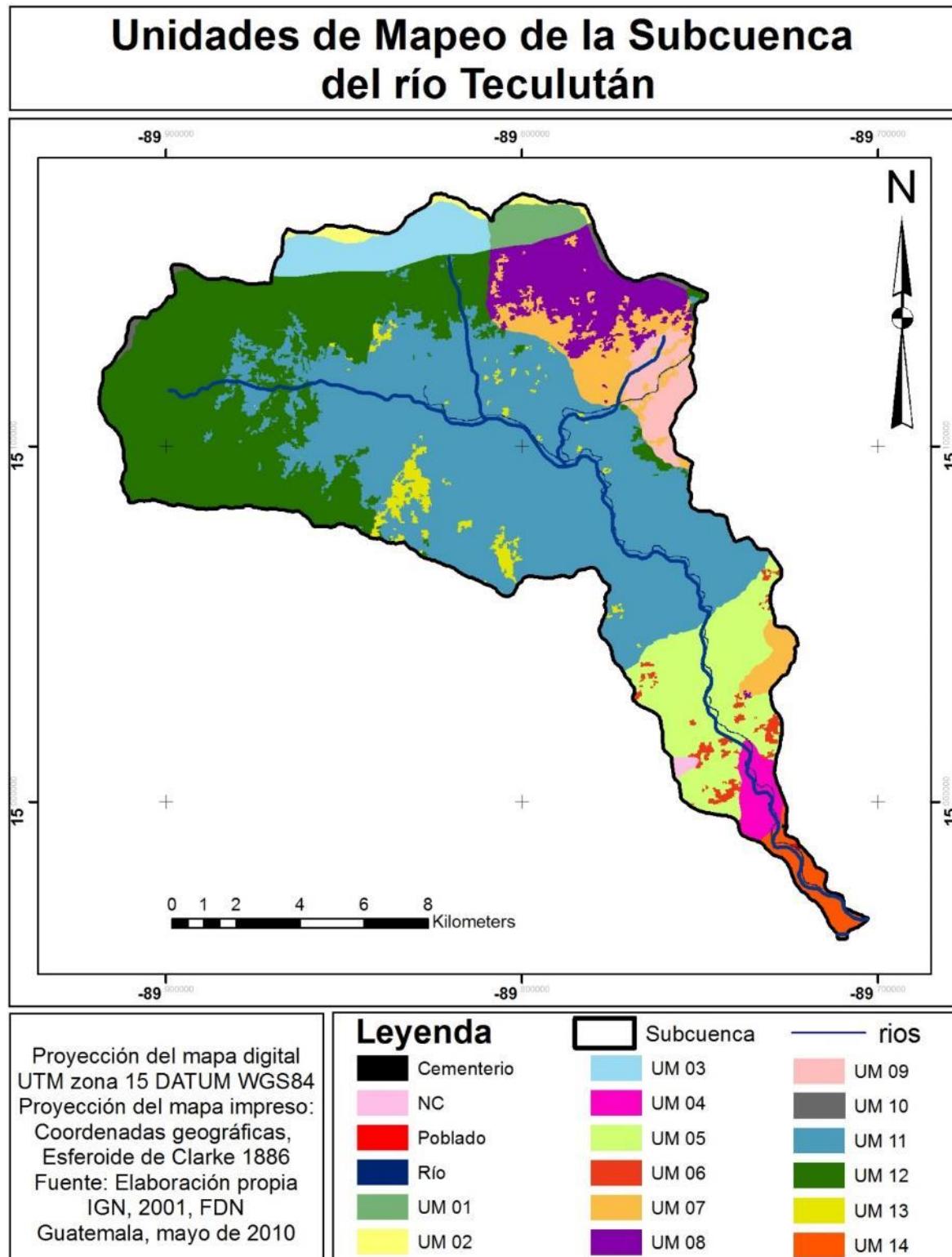
Mapa 3. Uso del suelo y cobertura vegetal 2003 de la subcuenca del río Teculután.



Cuadro 4. Unidades de mapeo de la subcuenca del río Tecolután.

UM	Geología	Taxonomía Suelo	Uso Suelo / Cobertura Vegetal 2003	Área (ha)	Área UM (ha)	Área UM %
1	I	Eo	Arbustos - Matorrales Bosque Latifoliado	7.66 299.75	307.41	1.53
2	I	UdPd	Arbustos - Matorrales Bosque Latifoliado	0.39 177.29	177.68	0.89
3	I	PsLs	Arbustos - Matorrales Bosque Latifoliado	1.16 790.16	791.32	3.94
4	Pzm	EpEfPsEo	Arbustos - Matorrales Granos Básicos Hortaliza - ornamental Mango	40.31 12.24 240.48 6.36	299.39	1.49
5	Pzm Pzm	EoPs EoPs	Arbustos - Matorrales Bosque Latifoliado	1757.91 1	1758.91	8.76
6	Pzm Pzm	EoPs EoPs	Granos Básicos Hortaliza - ornamental	159.4 4.35	163.75	0.82
7	Pzm	Eo	Arbustos - Matorrales	958.64	958.64	4.78
8	Pzm	Eo	Bosque Latifoliado Bosque Mixto Granos Básicos	1191.35 1.29 15.43	1208.07	6.02
9	Pzm	Eo	Bosque Conífero	480.49	480.49	2.39
10	Pzm	UdPd	Bosque Latifoliado	88.77	88.77	0.44
11	Pzm	PsLs	Arbustos - Matorrales	7901.48	7901.48	39.37
12	Pzm	PsLs	Bosque Conífero Bosque Latifoliado	61.66 5101.76	5163.42	25.73
13	Pzm	PsLs	Bosque Mixto Café Granos Básicos	266.28 1.31 53.44	321.03	1.60
9914	Qa	EpEfPsEo	Arbustos - Matorrales Granos Básicos Hortaliza - ornamental Melon - Sandia con riego	10.82 119.34 135.74 28.03	293.93	1.46
NC	Pi	EoPs	Arbustos - Matorrales Granos Básicos	29.86 7.96	37.82	0.19
			Cementerio Poblado Río	1.18 4.52 110.31	110.31	0.55
			TOTAL	20068.12	20068.12	100.00

Mapa 4. Unidades de mapeo (UM) de la subcuenca del río Teculután.



Capítulo III.II

Estudio de la erosión potencial en cuatro subcuencas de la RBSM, mediante la aplicación del método de la ecuación universal de erosión USLE

a) Contenido

Resumen 135

1	Introducción	136
2	Objetivos	137
2.1	Objetivo general.....	137
2.2	Objetivos Específicos.....	137
3	Metodología	138
4	Resultados y discusión	141
4.1	Análisis de la erosión y su relación con variables hidrológicas.....	141
4.2	Implicaciones en el manejo de la RBSM.....	149
5	Conclusiones y consideraciones finales	150
6	Bibliografía	151

Listas de Figuras

Figura 1. Flujograma para la determinación de la erosión hídrica potencial, de acuerdo al método USLE	140
Figura 2. Mapas de clasificación de tierras de acuerdo a su erosión potencial en subcuencas de sotavento.	142
Figura 3. Mapas de clasificación de tierras de acuerdo a su erosión potencial en subcuencas de transición y barlovento.....	143
Figura 4. Gráficas de relación de la erosión con variables hidrológicas.....	144
Figura 5. Gráficas de relación de la erosión con variables hidrológicas.....	146
Figura 6. Relación entre erosión y % de lluvia que recarga en microcuencas de las cuatro subcuencas evaluadas	147
Figura 7. Relación entre erosión y % de lluvia que escurre en microcuencas de las cuatro subcuencas evaluadas.	147
Figura 8. Relación entre erosión y % de lluvia que recarga en microcuencas de las subcuencas ubicadas en las regiones hidrológicas de sotavento y de transición.	148
Figura 9. Relación entre erosión y % de lluvia que escurre en microcuencas de la subcuenca Pueblo Viejo (barlovento).	148
Figura 10. Relación entre erosión y % de bosque en microcuencas de la subcuenca Pueblo Viejo (barlovento).	149

Listas de Cuadros

Cuadro 1. Descripción y métodos de obtención de los factores de la ecuación universal de pérdida de suelos	139
Cuadro 2. Determinación del Factor C.....	140
Cuadro 3. Erosión total en las cuatro subcuencas	141

Resumen.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la erosión hídrica en cuatro subcuenca representativas de la RBSM mediante la aplicación de la metodología basada en la ecuación universal de erosión de suelos (USLE, por sus siglas en inglés). Dicho método es de amplio reconocimiento y aplicación en el mundo.

La implementación de la investigación se concretó a la recopilación y análisis cartográfico de información básica disponible en el medio institucional guatemalteco. Dicha información consistió en los mapas de los cuatro factores principales que intervienen en la ecuación universal de erosión de suelos, los cuales son: erosividad de la lluvia, Factor R; erodabilidad de los suelos, Factor K; el efecto de la topografía, pendiente y longitud, Factor Ls. Estas capas cartográficas han sido desarrolladas por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala (MAGA, 2001). Además se determinó el efecto de la cobertura del suelo, Factor C, mediante la sobre posición del mapa de cobertura del suelo 2007, desarrollado por Fundación Defensores de la Naturaleza a escala de la RBSM.

A partir de la utilización de medios de sistemas de información geográfica y la multiplicación de los factores anteriormente descritos se logró estimar la erosión potencial en toneladas métricas a nivel de cada microcuenca de las cuatro subcuenca definidas. La información derivada de este ejercicio adicionada a la cartografía de microcuenca de Guatemala y la información hidrológica proveniente del balance hídrico de suelos, resultó adecuada para analizar y comparar la erosión en las diferentes regiones hidrológicas evaluadas.

Se determinó que para sotavento tiende a aumentar la erosión en aquellos sitios de baja capacidad de recarga hídrica asociados a menores precipitaciones y suelos poco desarrollados (inceptisoles). Para el caso de barlovento el aumento de la erosión presentó una mayor correlación con la disminución de la capacidad de recarga de los suelos, pero asociado principalmente, con el cambio en la cobertura del suelo (Factor C).

Esto adquiere implicaciones directas en el manejo de la RBSM, ya que precisamente la región de barlovento se caracteriza por un lado de presentar las mayores tasas de erosión, correlacionadas fuertemente al factor de ausencia de cobertura, y por el otro que estos sitios están fuera del área protegida. Por lo tanto para contrarrestar de manera significativa la erosión y degradación de suelos en el área de influencia de la RBSM es necesario, desarrollar prácticas de conservación de suelos o al menos la recuperación de la cobertura del suelo en zonas de amortiguamiento y uso sostenido de la RBSM, pero especialmente fuera del área protegida.

La información cartográfica disponible en el medio institucional guatemalteco se considera adecuada para la analizar la erosión hídrica en regiones hidrológicas contrastantes.

b) Introducción.

El clima, el suelo, la topografía, y las prácticas de conservación y manejo de la cobertura de suelos, afectan la erosión del suelo. La habilidad para predecir estos efectos es una clave para el planeamiento de la conservación. Para resolver un gran número de problemas de la erosión y pérdida de la capacidad productiva de los suelos y manejo de cuencas se requiere hacer estimaciones de la erosión (rendimiento de sedimento) en campos de cultivo o cuencas. Existen varios modelos simples y complicados para predecir la erosión a nivel de suelo, parcelas, campo y cuencas. Estos modelos varían en sus requerimientos de insumos y en su habilidad de predecir otros procesos edáficos, tales como hidrología, nutrientes, pérdidas por lixiviación u otros procesos y producción de cultivos (FAO, 2010).

Wischmeier y Smith (1978) proponen la implementación de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE, por sus siglas en inglés), describen cada uno de los factores que la conforman y proponen métodos para evaluar cada uno de ellos. De acuerdo a los autores la USLE fue desarrollado para:

El cálculo de la erosión se efectuó a través de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, método desarrollado por Wischmeier y Smith (1978).

- predecir el movimiento promedio anual de suelos desde una pendiente específica, bajo condiciones de uso y manejo específicos.
- orientar la selección de prácticas de conservación para localidades específicas.
- estimar la reducción de pérdida de suelos que se puede lograr con cambios de manejo efectuados por el agricultor; y
- determinar el largo máximo de pendiente tolerable para un sistema de cultivo determinado.

Entre las ventajas del USLE incluyen facilidad de uso, simplicidad, y una base de datos amplia sobre la cual fue desarrollado. Sin embargo, tiene varias limitaciones. Los métodos para estimar los seis factores no se encuentran disponibles en muchos lugares. Está basado sobre el supuesto de pendiente de terreno, suelos, cultivo y manejo uniformes. Es un procedimiento estadístico (empírico o "agrupado") que no contempla los procesos físicos de separación, transporte y sedimentación en forma mecánica. Su aplicación en algunos fisiografías o ecosistemas es limitada, tal como en praderas. Finalmente, no fue diseñado para estimar rendimientos de sedimentación en cuencas complejas (FAO, 2010; FAO, 2001).

Sin embargo se han ido desarrollando métodos y cartografía para palear algunos de sus inconvenientes, especialmente vinculado a la disponibilidad de información. En Guatemala han sido elaborados y están disponibles los materiales cartográficos básicos para la implementación de esta metodología. En tal sentido se considera importante validar los instrumentos disponibles y analizar su aplicabilidad en sitios hidrológicos contrastantes. Esto a su vez es importante para derivar directrices de manejo de los recursos naturales y establecer su relación con los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica. Siendo este el objetivo principal del presente trabajo.

c) Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la erosión hídrica potencial en cuatro subcuenca representativas de la RBSM.

3.2 Objetivos Específicos.

- Implementar análisis cartográfico de la información pertinente para la estimación de la erosión hídrica de suelos.
- Analizar comparativamente las regiones hidrológicas de la RBSM.
- Definir implicaciones para los objetivos de conservación de la RBSM

d) Metodología

A continuación se describe brevemente la metodología empleada. El cálculo de la erosión se efectuó a través del análisis cartográfico y la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, método desarrollado por Wischmeier y Smith (1978).

La tasa de erosión dada para un sitio es determinada por la forma particular en la cual los niveles de variables físicas y de manejo están combinadas. De acuerdo a USLE se utilizan seis factores: erosividad de la lluvia (R), susceptibilidad de erosión del suelo (K), largo de la pendiente (L), magnitud de la pendiente (S), cubierta y manejo de cultivos y residuos (C), y prácticas de conservación (P), para estimar la pérdida de suelos promedio (A) por el período de tiempo representado por R, generalmente un año.

$$A=R \times K \times L \times S \times C \times P$$

A = pérdida de suelos calculada por unidad de superficie A.

R = erosividad de la lluvia.

K = erodabilidad de los suelos

L = largo de la pendiente

S = magnitud de la pendiente

C = cobertura del suelos

P = prácticas de conservación de suelos.

A continuación se describen los factores y se define el método empleado para su obtención en esta investigación.

Cuadro 7. Descripción y métodos de obtención de los factores de la ecuación universal de pérdida de suelos.

Factor	Descripción	Método
A	Es la pérdida de suelos calculada por unidad de superficie, expresada en las unidades seleccionadas para K y el período seleccionado para R, generalmente toneladas (t) hectárea (ha) $^{-1}$ año $^{-1}$.	Multiplicación de capas cartográficas correspondientes a los factores de la ecuación universal de pérdida de suelos y recorte de las subcuencas bajo análisis, todo ello por medio de la aplicación de SIG.
R	Mide la energía cinética de la lluvia sobre la superficie del suelo, erosividad de la lluvia.	Aplicación de la capa cartográfica de Factor R, escala 1:250,000, publicado por MAGA, 2002.
K	El factor susceptibilidad de erosión del suelo, es la tasa de pérdida de suelos por unidad, erodabilidad del suelo.	Aplicación de la capa cartográfica de Factor K, escala 1:250,000, publicado por MAGA, 2002.
L	El factor de largo de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelos en el largo de la pendiente específica con respecto a un largo de pendiente estándar (22,13 m).	Aplicación de la capa cartográfica de Factor Ls, escala 1:250,000, publicado por MAGA, 2002.
S	El factor de magnitud de la pendiente, es la proporción de pérdida de suelos de una superficie con una pendiente específica con respecto a aquella en la pendiente estándar de 9%, con todos los otros factores idénticos.	
C	El factor cubierta y manejo, es la proporción de pérdida de suelo en una superficie con cubierta y manejo específico con respecto a una superficie idéntica en barbecho, con labranza continua.	Se utilizó el mapa de cobertura del suelo elaborado por Fundación Defensores de la Naturaleza 2007
P	El factor de prácticas de apoyo de conservación, es la proporción de pérdida de suelo con una práctica de apoyo como cultivo en contorno, barreras vivas, o cultivo en terrazas, con respecto a aquella labranza en el sentido de la pendiente.	Se descartó el uso de este factor por carecer de información confiable, ser muy poco significativas las prácticas de conservación de suelos implementadas en el área de estudio y los permite la metodología.

La aplicación del factor C El factor de cobertura, se basa en valores generados por distintos autores. Los valores oscilan entre 0 y 1. A continuación se describen los factores empleados (Cuadro 1)

Cuadro 8. Determinación del Factor C.

Tipo de uso de la Tierra	Factor C	Razón
Bosque latifoliado	0.001	El rango oscila entre 0.0001 y 0.001, con una cobertura mayor del 75% del dosel. El bosques no ha sido disturbado, la infiltración y contenido de materia orgánica es alta y la mayor parte del suelo está cubierto por una capa de hojas caída y mulch.
Bosque coníferas	0.006	Es el punto medio del rango de 0.003 a 0.009 propuesto por la metodología.
Hortalizas	0.49	Índice generalmente aceptado para hortalizas
Pasto natural	0.09	Cobertura de alrededor del 25% de árboles y con 40% como mínimo de suelo con cobertura (pasto)

A continuación, en la Figura 1 presenta el arreglo de mapas empleado para estimar la pérdida de suelo en las subcuencas bajo estudio. Cabe mencionar que los datos fueron obtenidos también a escala de microcuenca

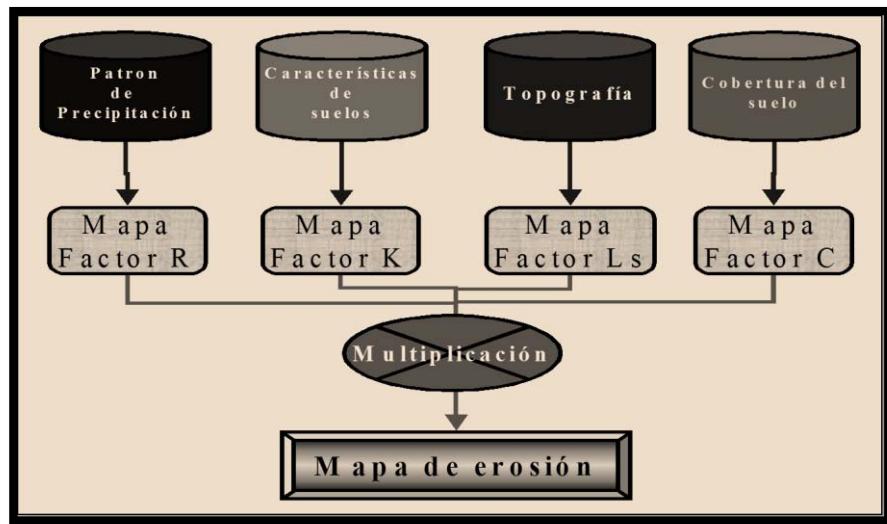


Figura 26. Flujograma para la determinación de la erosión hídrica potencial, de acuerdo al método USLE

e) Resultados y discusión.

3.3 Análisis de la erosión y su relación con variables hidrológicas.

Para analizar la erosión se parte de la información general (Cuadro 3) en la que se evidencia una gran diferencia entre la erosión de barlovento y las regiones de sotavento y la transicional. El promedio de la erosión hídrica por ha para la cuenca Pueblo Viejo (22 Ton/ha/año) duplica al promedio de la erosión en las subcuencas de Pasabien, Teculután y San Jerónimo (entre 5 y 10 ton/ha/año). Para la cuenca de Pueblo Viejo esto puede considerarse alarmante ya que al año se pierden 224 mil toneladas de sedimentos, además duplica la erosión que puede considerarse leve o natural, la cual es de menos de 15 Ton/ha/año (FAO, 2001).

Cuadro 9. Erosión total en las cuatro subcuencas

Subcuenca	Extensión (ha)	Ton/ha/año	Ton/Año
Pasabien	10,050	10.16	80,621
Teculután	20,109	5.37	98,266
San Jerónimo	22,805	7.51	158,733
Pueblo Viejo	14,867	21.66	224,804
Promedio		11	

Para comprender las grandes diferencias de la erosión en las subcuencas se realizó un mapeo y se clasificaron las tierras de acuerdo a su categoría de erosión (Figura 2). En estos mapas se puede visualizar que la erosión se distribuye, generalmente siguiendo un gradiente altitudinal. En las partes altas de las cuencas se presentan los menores grados de erosión estando en las categorías de 0 a 5 Ton/ha/año.

En las partes media alta, media y baja predominan las categorías entre 5 y 15 Ton/ha/año, al menos en las regiones hidrológicas de sotavento y transicional. En la subcuenca Pueblos Viejo en la parte media y baja predominan las categorías de erosión entre 15 y 50, así como entre 50 y 150 Ton/ha/año. Esto es otra evidencia de alta heterogeneidad entre las regiones hidrológicas así como en los diferentes estratos de las subcuencas. Asimismo se logra evidenciar patrones de erosión respecto a las categorías de conservación de la RBSM, lo cual se abordará posteriormente. Para comprender la alta heterogeneidad de la distribución espacial de la erosión se procedió estudiar las variables hidrológicas que mayor correlación tienen con la erosión hídrica. En este sentido se elaboraron comparaciones gráficas, las cuales se presentan en la Figuras 4 y 5.

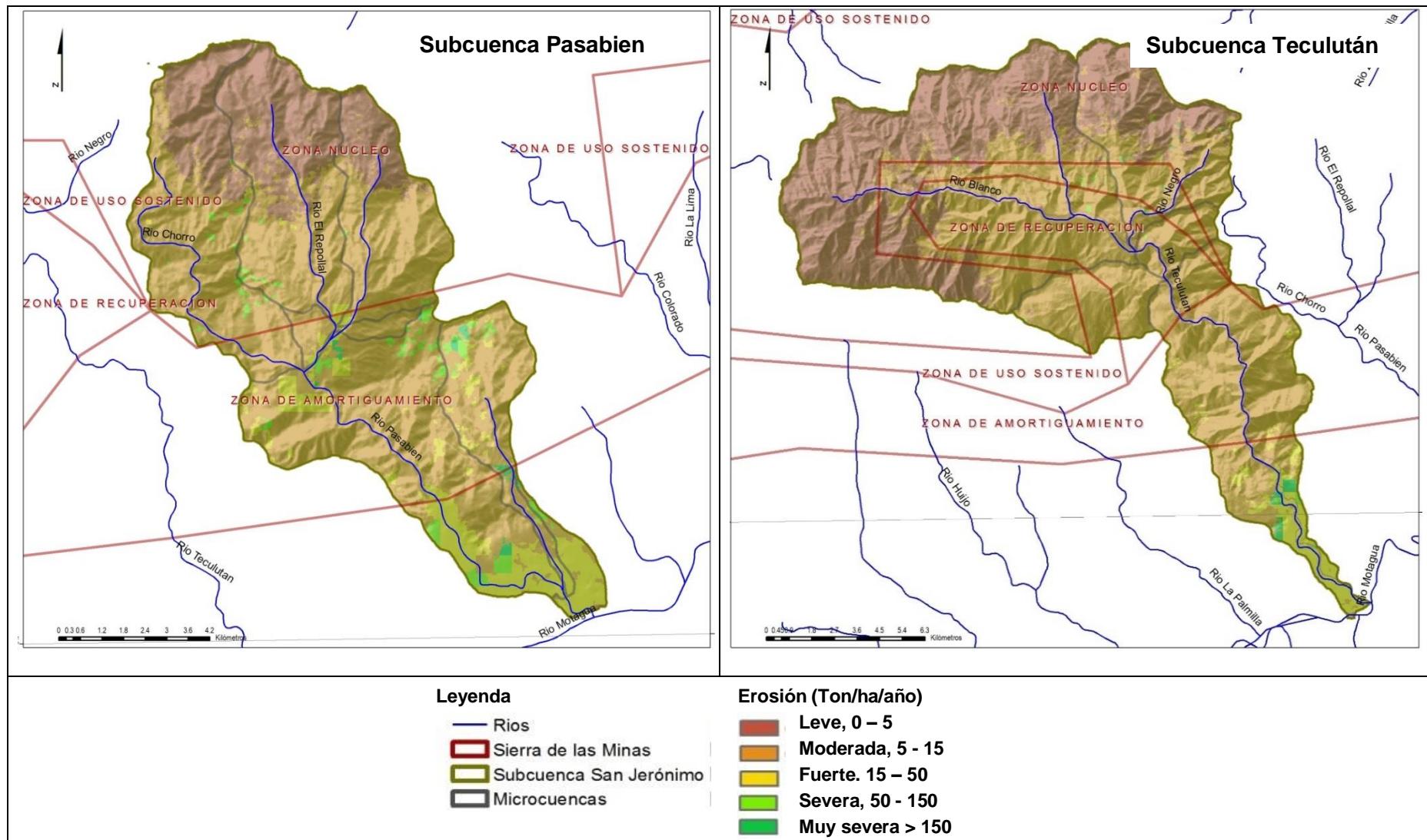


Figura 27. Mapas de clasificación de tierras de acuerdo a su erosión potencial en subcuencas de sotavento.

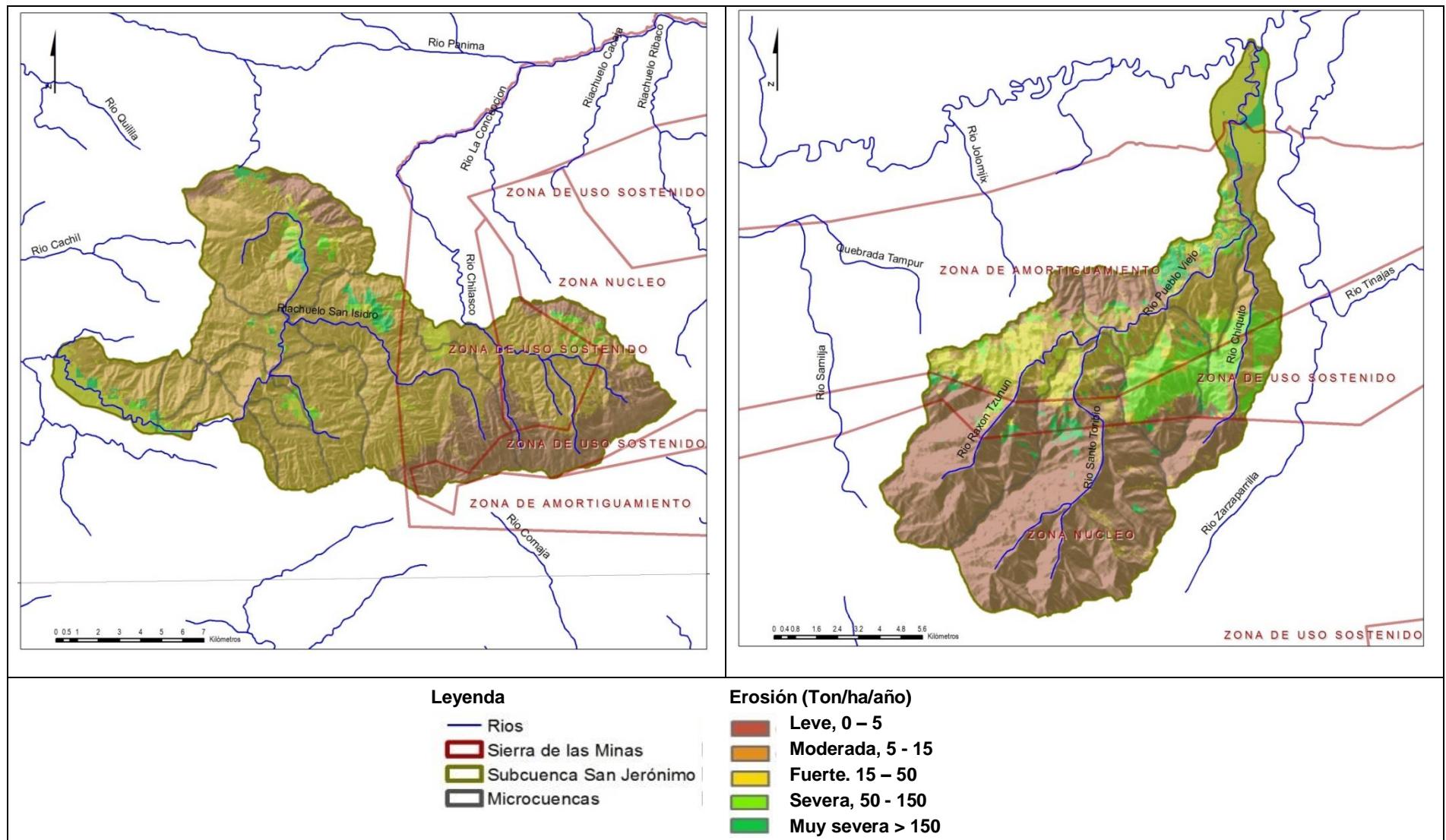
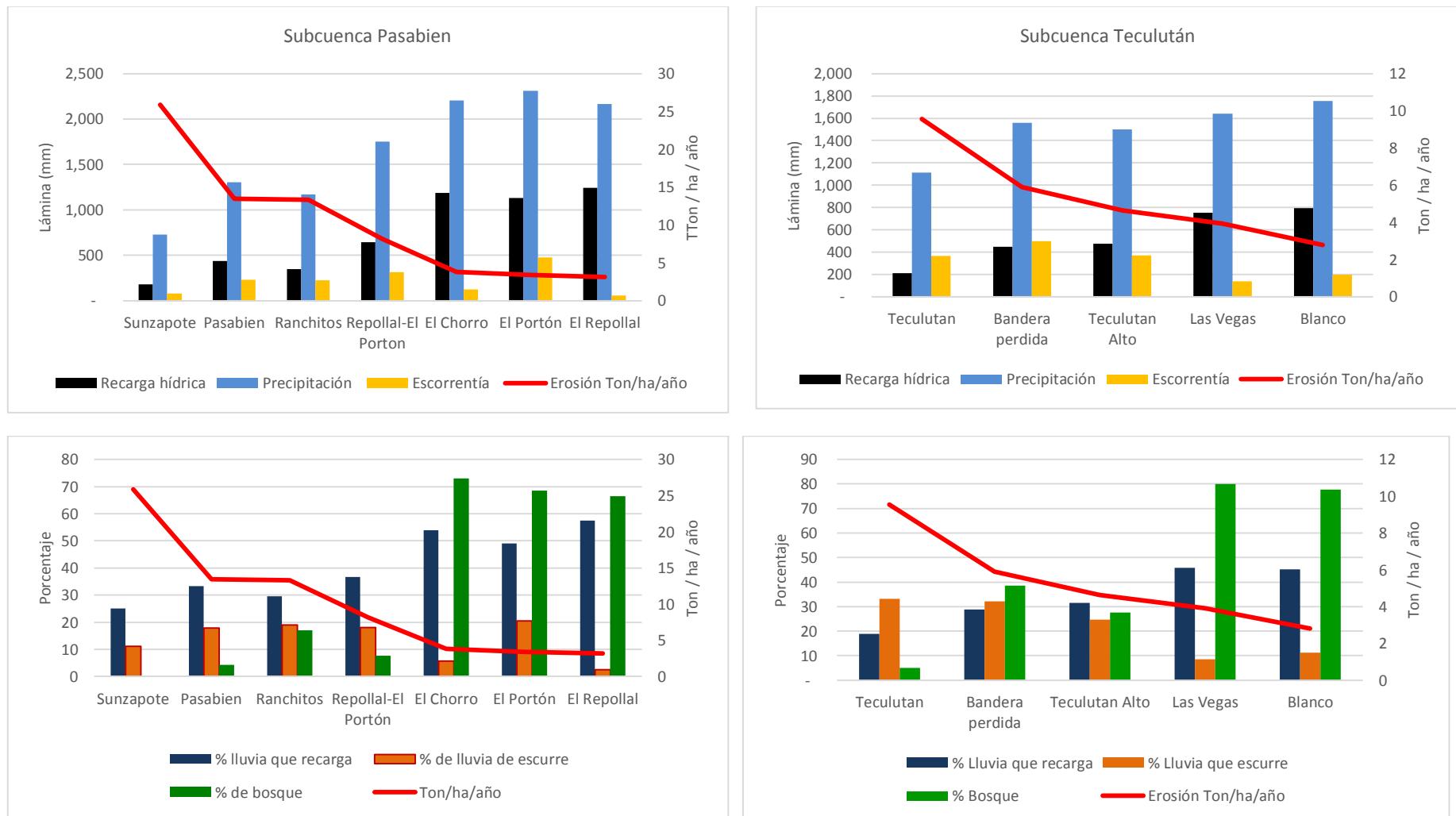


Figura 28. Mapas de clasificación de tierras de acuerdo a su erosión potencial en subcuenca de región hidrológica de transición y barlovento.



Arriba: relación entre erosión (línea) y láminas (mm) recarga hídrica, precipitación y escorrentía para cada microcuenca.
 Abajo: relación entre erosión (línea) y porcentajes de lluvia que recarga, lluvia que escurre y bosque para cada microcuenca.

Figura 29. Gráficas de relación de entre erosión y variables hidrológicas en subcuenca región hidrológica de sotavento.

En la Figura 4 se presentan las subcuenas ubicadas en sotavento, Pasabien a la izquierda y Teculután a la derecha. Para las gráficas correspondientes a Pasabien se presenta en la parte superior una comparación, a escala de microcuenas, entre las diferentes láminas (mm) de recarga, precipitación y escorrentía superficial con la erosión dada en Ton/ha/año. Se logra evidenciar, en términos generales, que existe cierta correlación inversamente proporcional entre erosión y las láminas de precipitación y recarga, es decir, que con las láminas menores de precipitación y recarga se presentan altas tasas de erosión y viceversa. Esto sugiere que los fenómenos de recarga y lluvia son excluyentes a la erosión. Sin embargo, contrario a lo esperado, no se logró establecer correspondencia directa entre la escorrentía y erosión.

Para la subcuenca Pasabien (Figura 4) en la gráfica inferior izquierda se ilustra la comparación entre la erosión en Ton/ha/año con los porcentajes de lluvia que recarga, de lluvia que escurre y de bosque. Estas presentan baja correlación. El análisis de la subcuenca Teculután presenta un patrón muy similar al de la subcuenca Pasabien, sin embargo si hay correspondencia entre % de lluvia que escurre y la erosión en la gráfica inferior derecha (Figura 4).

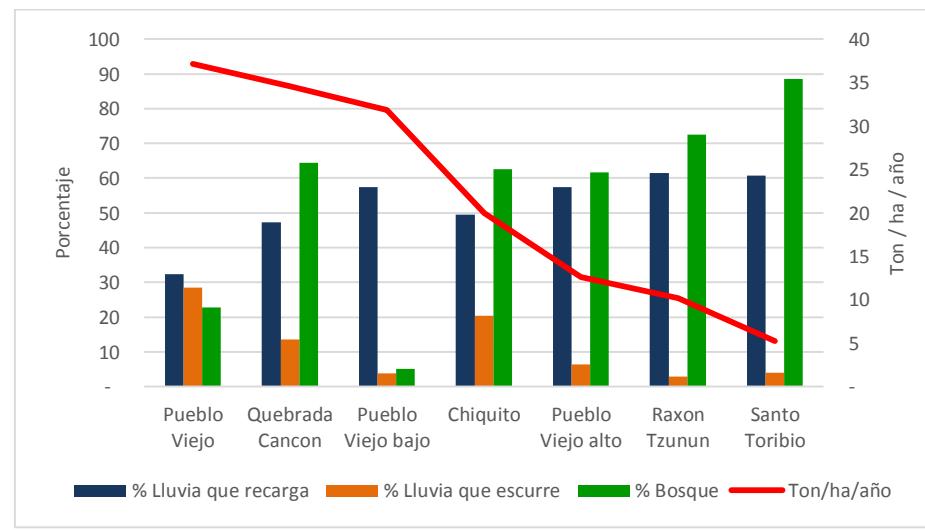
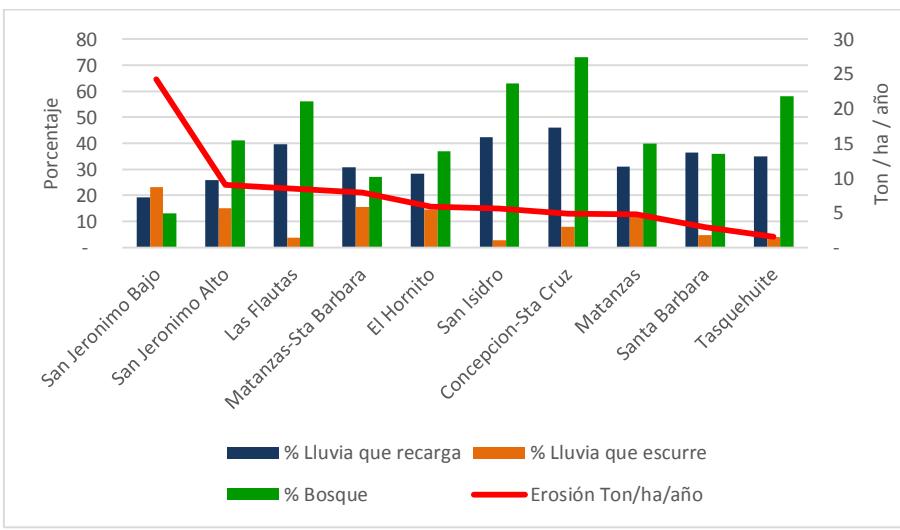
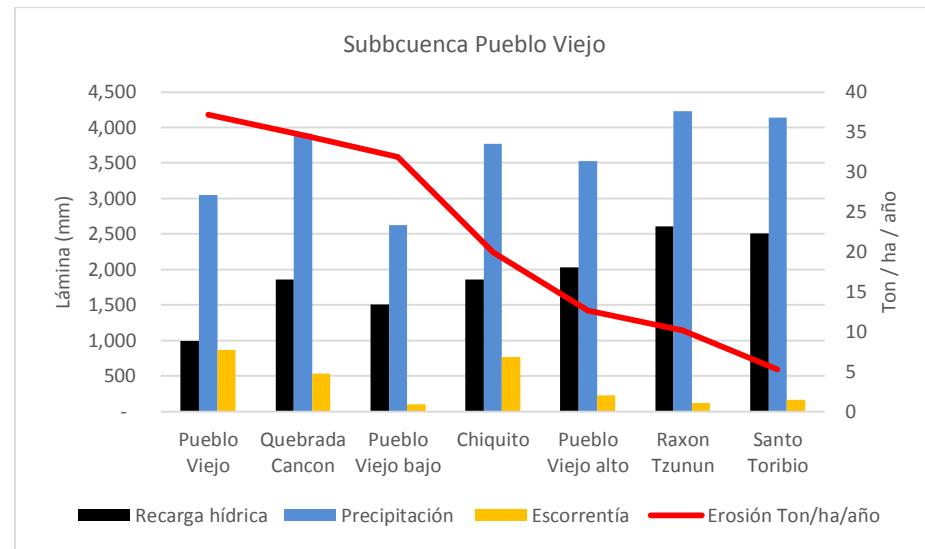
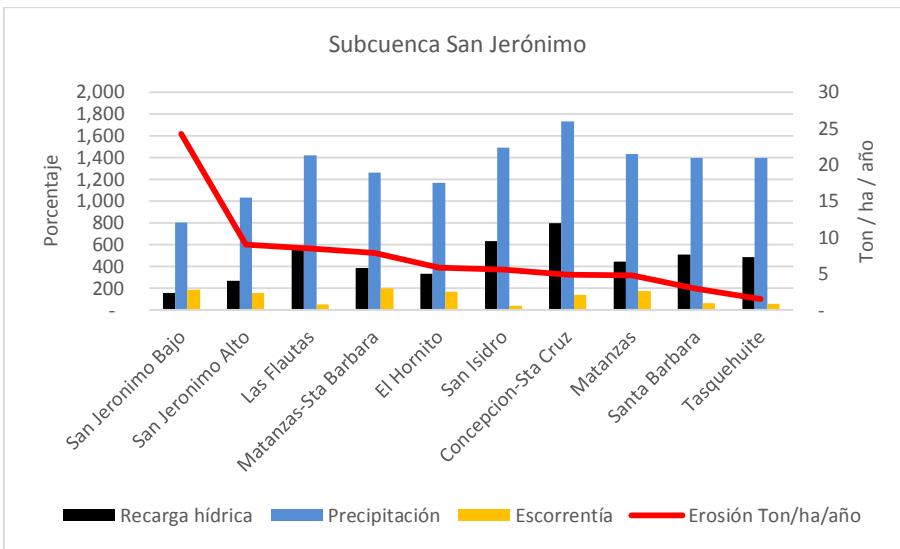
En la Figura 5 se presentan las gráficas correspondientes a la comparación de las variables hidrológicas y la erosión para las regiones de barlovento y región transicional. Para la subcuenca de San Jerónimo, izquierda, en la parte superior se evidencia la muy baja correlación entre la erosión y las variables de láminas de recarga hídrica, precipitación y escorrentía. De igual manera no se evidenció correspondencia entre la erosión y las variables de porcentajes de lluvia que recarga y que escurre ni con el porcentaje de bosque. Las microcuenas de esta subcuenca fueron las que menor grado de relación presentaron entre la erosión y las variables hidrológicas evaluadas.

Para la subcuenca Pueblo Viejo (Figura 5) en la parte superior derecha se muestran las relaciones entre la erosión y las principales variables hidrológicas en láminas, en las cuales se aprecia que éstas últimas son mucho más homogéneas entre las microcuenas definidas que en las subcuenas de Pasabien, Teculután y San Jerónimo. Sin embargo los valores de erosión son altamente contrastantes. En tal sentido no se logró evidenciar altas correlaciones entre estas variables.

Para la correlación entre erosión y porcentajes de lluvia que recarga, lluvia que escurre y bosque tampoco existen altas correspondencias. Sin embargo los extremos contrastantes de alta erosión corresponden con los valores más altos de lluvia que escurre y de igual manera los valores más bajos para ambos también corresponden. Esta es la única relación que se encontró.

Todo lo anterior permite corroborar el planteamiento teórico de que la erosión laminar es un fenómeno multifactorial que no puede ser relacionado directamente con una o pocas variables hidrológicas a escala de microcuenca. Más bien es importante analizar la influencia de cada factor por separado. Esto se logra evidenciar en las Figuras 6 y 7 en las que se presentan gráficos que muestran la relación entre la erosión en Ton/ha/año y los porcentajes de lluvia que recarga y de lluvia que escurre mostrándose que no existe ninguna correlación significativa.

Sin embargo al regionalizar hidrológicamente las subcuenas se logró definir para las regiones de sotavento y de transición un grado de correlación más alto entre la erosión y el porcentaje de lluvia que recarga (Figura 8). Y en la región de barlovento se encontró mayor correlación entre la erosión y porcentaje de lluvia que escurre (Figura 9).



Arriba: relación entre erosión (línea) y láminas (mm) recarga hídrica, precipitación y escorrentía para cada microcuenca.
Abajo: relación entre erosión (línea) y porcentajes de lluvia que recarga, lluvia que escurre y bosque para cada microcuenca.

Figura 30. Gráficas de relación de entre erosión y variables hidrológicas en subcuenca región hidrológica región de transición (San Jerónimo) y de barlovento (Pueblo Viejo)

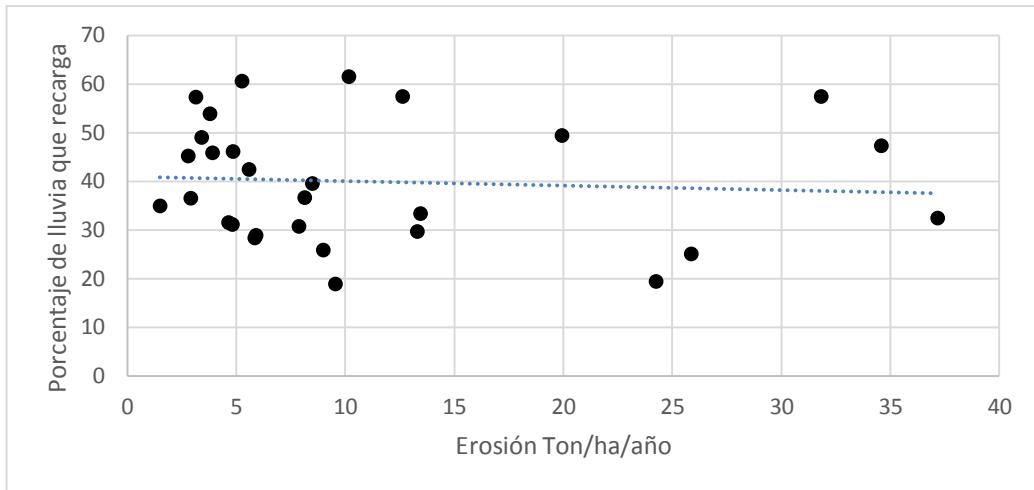


Figura 31. Relación entre erosión y % de lluvia que recarga en microcuenca de las cuatro subcuenca evaluadas

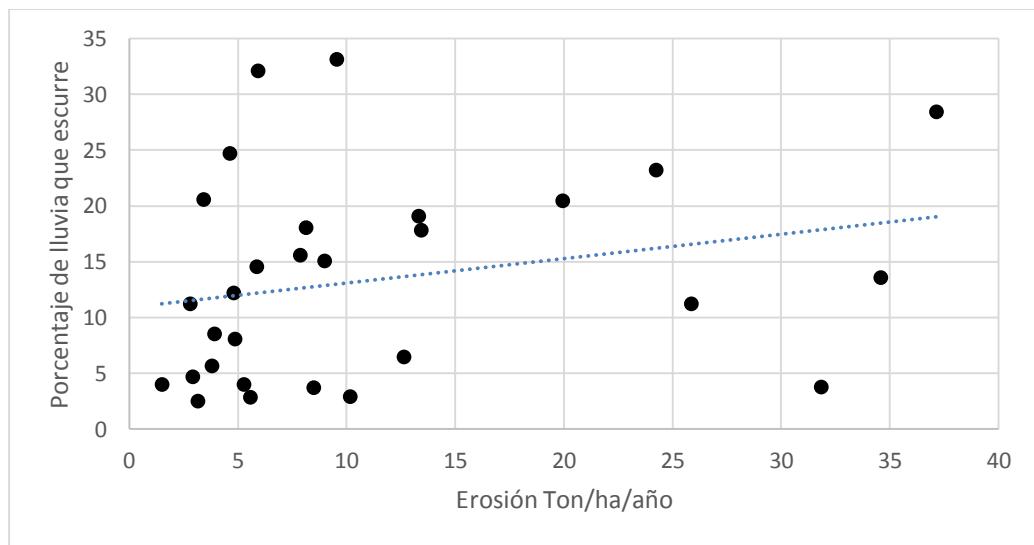


Figura 32. Relación entre erosión y % de lluvia que escurre en microcuenca de las cuatro subcuenca evaluadas.

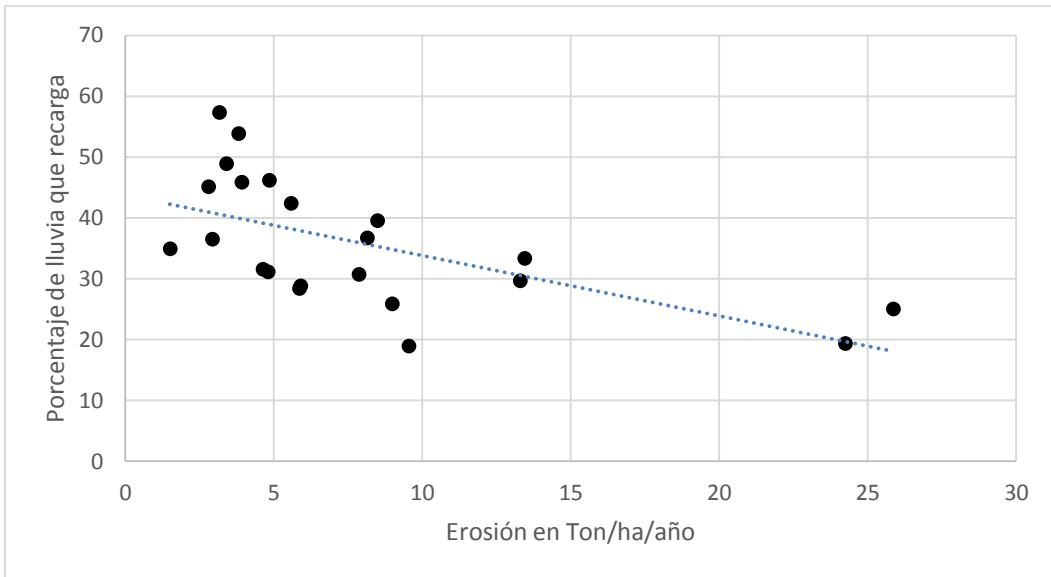


Figura 33. Relación entre erosión y % de lluvia que recarga en microcuenca de las subcuenca ubicadas en las regiones hidrológicas de sotavento y de transición.

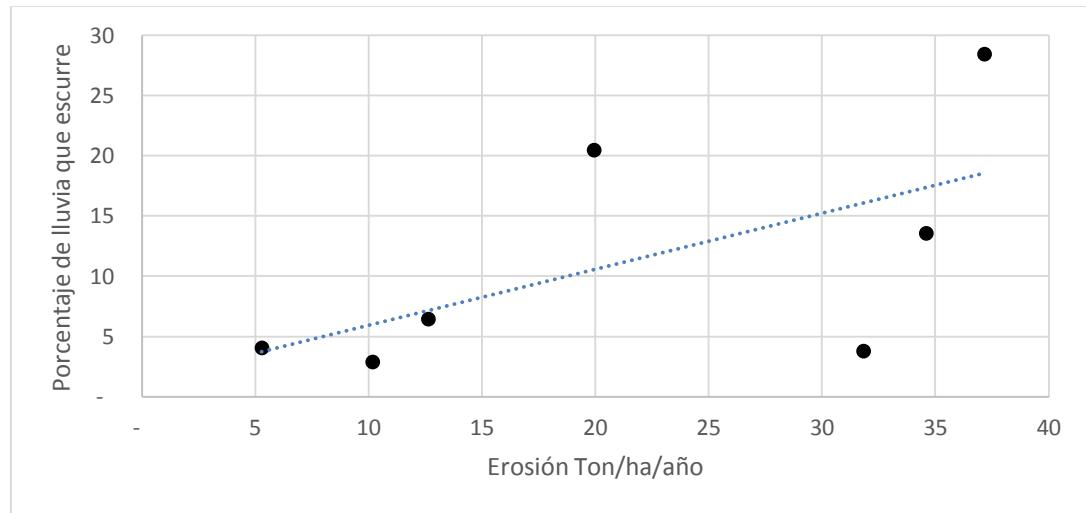


Figura 34. Relación entre erosión y % de lluvia que escurre en microcuenca de la subcuenca Pueblo Viejo (barlovento).

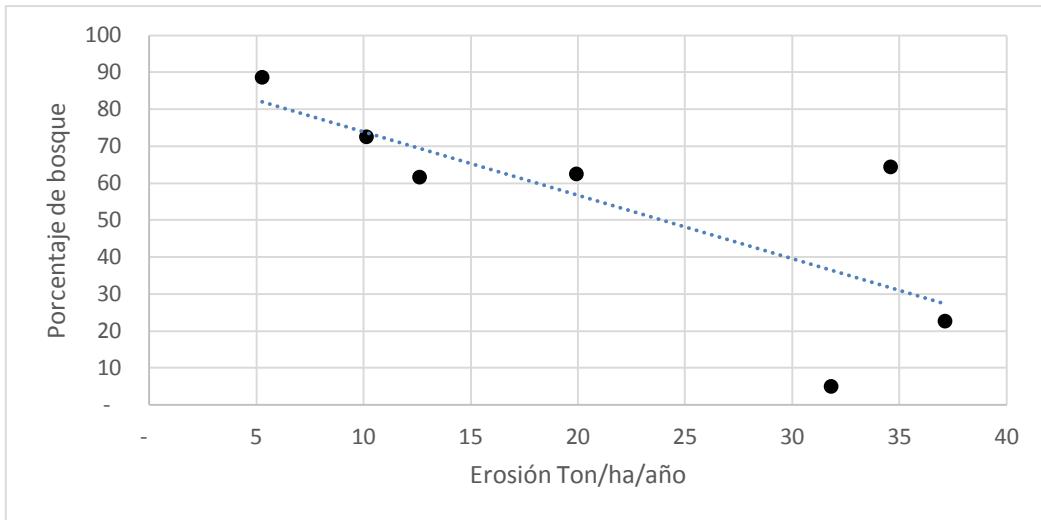


Figura 35. Relación entre erosión y % de bosque en microcuenca de la subcuenca Pueblo Viejo (barlovento).

Esto sugiere que el proceso de erosión tiende a incrementarse en sitios poco favorables para la recarga hídrica. En el caso de sotavento prevalece la erosión en aquellos sitios de baja capacidad de recarga hídrica relacionados principalmente a menores precipitaciones altas tasas de evapotranspiración, lo que a su vez está vinculado con suelos poco desarrollados y con baja conductividad hidráulica, así como escaso desarrollo o recuperación de la vegetación en las partes media baja de las subcuenca. La erosión aumenta en función del descenso en el gradiente altitudinal, lo cual, se vincula a la presencia de suelos inceptisoles. Estos suelos fueron descritos en el capítulo II.

En el caso de barlovento con condiciones de precipitación no tan contrastantes en el gradiente altitudinal existe mayor incidencia de la presencia o no de la cobertura boscosa como un factor determinante para la determinación de lluvia que se convierte en escorrentía. En la Figura 10 se presenta cierta correspondencia entre la erosión y el porcentaje de bosque. Evidentemente en esta región hidrológica adquiere mucha mayor relevancia el factor de cobertura. Es importante recalcar que en esta subcuenca se presentan los valores más altos de erosión

3.4 Implicaciones en el manejo de la RBSM.

Como se hizo evidente los datos más altos de erosión se presentan en la parte media y baja de las cuatro subcuenca. Estos sitios coinciden, principalmente, con las zonas de amortiguamiento, uso sostenido y zonas aledañas al área protegida. En tal sentido es importante impulsar programas de conservación de suelos y de recuperación y conservación de la cobertura boscosa. En este aspecto sobresale la región de sotavento por presentar mayor sensibilidad al factor de cobertura.

Las partes media de cada una de las subcuenca son las más susceptibles a la erosión y degradación de suelos. Por lo tanto es conveniente considerar idoneidad de que estas áreas sean categorizadas como zonas de uso sostenido y amortiguamiento. Esto adquiere mayor relevancia en la subcuenca de Pueblos Viejo y en la región hidrológica de barlovento.

f) Conclusiones y consideraciones finales.

Los procesos de erosión son altamente diferenciados en las tres regiones hidrológicas definidas para la RBSM.

La región hidrológica con mayores valores de erosión es barlovento (Pueblo Viejo), con un promedio de 20 Ton/ha/año y en la microcuenca del mismo nombre se presenta una erosión promedio de 35 Ton/ha/año. Estos valores exceden en cerca de un 100% a las estimaciones realizadas para las demás subcuenca. La subcuenca con menor erosión es la de Teculután, con cerca de 5 Ton/ha/año.

Se determinó que para el área de estudio la erosión hídrica es un proceso biofísico que tiene una tendencia a aumentar significativamente en zonas que son relativamente menos favorables para la recarga hídrica.

En la región de sotavento se consideran más susceptibles a la erosión sitios con menores precipitaciones y con suelos menos desarrollados (inceptisoles). En la región hidrológica de barlovento adquiere mayor relevancia el factor de cobertura. En tal sentido la implementación son de mayor impacto las actividades de conservación de suelos así como la conservación o recuperación de la cobertura de bosque en la región de barlovento. Esta subcuenca presenta las áreas con datos más altos de erosión, precisamente fuera del área protegida.

Respecto a los aspectos metodológicos se considera adecuado el método de USLE para la evaluación de la problemática de la erosión en la RBSM y el análisis comparativo de las diferentes regiones hidrológicas a escala de microcuenca y subcuenca. Esto partiendo del uso de información ya disponible en el medio institucional guatemalteco. Sin embargo es recomendable analizar el efecto de cada factor de erosión (erosividad, erodabilidad, cobertura, pendiente, etc.) por separado para tener mejores elementos de análisis y de interacción de los factores, de acuerdo a las características biofísicas e hidrológicas de cada sitio. Además es importante analizar el factor fisiográfico y de gradientes altitudinales, así como su relación con las zonas de recarga hídrica.

g) Bibliografía principal

- FAO. (1992). *Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Guía FAO Conservación.* México: FAO.
- FAO. (2001). *Manual of local level degradation assessment of land degradation sustainable and management and livelihoods.* . Rome: FAO, Lada project.
- FAO. (junio de 2010). *Predicción de la erosión de suelos.* Obtenido de Depósito documentos de la FAO: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/t2351s03.htm>
- Fundación Defensores de la Naturaleza. (2003). *III Plan Maestro 2003-2008 de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas.* Guatemala: Fundación Defensores de la Naturaleza.
- Fundación Defensores de la Naturaleza. (2004). *Valoración de la producción agrícola bajo riego en la cuenca San Jerónimo.* Guatemala: FDN.
- Fundación Defensores de la Naturaleza. (2010). *IV Actualización del Plan Maestro de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas.* Guatemala: FDN.
- Herrera, I. (1995). *Manual de Hidrología.* Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Kimaro, D., Poesen, J., Msanya, B., & Deckers, J. (2008). Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Intertill and Rill erosion. *Catena*, 75, 38–44.
- Linsley, R. J. (1988). *Hidrología para ingenieros.* México: Mc Graw Hill.
- Machorro, S. (2010). *Estudio hidrogeológico de las cuencas Pasabien y Pueblo Viejo.* . Guatemala : World Wildlife Fund.
- MAGA. (2001). *Mapa de erosión potencial de Guatemala.* Guatemala: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
- OMM, Organización meteorológica Mundial . (1994). *Guía de prácticas hidrológicas.* Washington: Organización Meteorológica Mundial.
- Postel, S., & Thompson, B. (2005). Watershed protection: Capturing the benefits of nature's water supply services. *Ecological Forum*, 95-108.
- Sandoval, I. (1989). *Principios de riego y drenaje.* Guatemala: Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.

CAPÍTULO III.III

**Análisis de los servicios ecosistémicos hidrológicos en la subsubcuenca
Teculután, mediante el monitoreo ecohidrológico en dos años climáticos
extremos.**

Contenido

Resumen	158
1	Introducción 159
2	Objetivos 160
2.1	Objetivo general 160
2.2	Objetivos específicos 160
3	Metodología. 161
3.1	Delimitación de ecosistemas hidrológicamente homogéneos 161
3.2	Integración de información hidroclimática histórica. 161
3.3	Generación de información ecohidrológica detallada. 162
3.4	Determinación de servicios de regulación hidrológica prioritarios e indicadores para su evaluación y monitoreo. 166
4	Resultados y discusión. 168
4.1	Síntesis de la clasificación de zonas hidrológicamente homogéneas bajo el enfoque ecohidrológico. 168
4.2	Monitoreo ecohidrológico del período mayo 2009 – abril 2011. 170
4.2.1	<i>Año hidrológico mayo 2009-abril 2010.</i> 170
4.2.2	<i>Años hidrológicos 2010 - 2011 y 2009-2010.</i> 175
4.2.3	<i>Precipitación de los años hidrológicos 2009-2010 y 2010-2011 y su relación con la escorrentía superficial y la erosión en la subcuenca.</i> 180
4.3	Definición y evaluación de servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en la subcuenca Tecolután 186
4.3.1	<i>Fundamentos para la definición de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en la subcuenca.</i> 187
4.3.2	<i>Cuantificación biofísica de la provisión de servicios ecosistémicos hidrológicos.</i> 188
4.3.3	<i>Información ecohidrológica de años extremos y su aplicación a esquemas de pago por servicios ecosistémicos hidrológica y su valoración en la subcuenca.</i> 193
4.3.4	<i>Determinación de indicadores de evaluación y monitoreo de los servicios de regulación hidrológica de la subcuenca.</i> 196
5	Conclusiones 199
6	Bibliografía 200

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación de estaciones AWS y medidores de intensidad de precipitación y de caudal de salida en la subsubcuenca Teculután.	163
Figura 2. Estación AWS ubicada en sitio representativo ecosistema bosque nuboso (2300 msnm).	164
Figura 3. Estación AWS ubicada en campamento minero San Lorenzo (ecosistema de pino-encino, 1750 msnm).	164
Figura 4. Pluviómetro automático dotado con un balancín para medición de la precipitación, su intensidad y la duración de los aguaceros (izquierda) y totalizadores de precipitación (derecha).	164
Figura 5. Ubicación de la estación de control de la altura de flujo, control visual, tres lecturas diarias (primera presa ubicada a 30 minutos a pie al norte del poblado Teculután)	165
Figura 6. Muestreo de sedimentación y erosión en el río Teculután, estación hidrológica las minas.	166
Figura 7. Delimitación de los ecosistemas hidrológicamente homogéneos.	169
Figura 8. Contraste de la precipitación de las estaciones de Pasabien (1994-2000) y Teculután en junio, julio y agosto de 2009.	170
Figura 9. Relación entre intensidades de precipitación ocurridas en el año hidrológico 2009-2010 y la ocurrencia conceptual de escorrentía y erosión, de acuerdo a propiedades hidráulicas del suelo.	172
Figura 10. Relación de la lámina de precipitación máxima (intensidad horaria) observada y la lámina necesaria para la ocurrencia de escorrentía o erosión.	173
Figura 11. Comparación de la apariencia del caudal en la estación de aforo durante el 2009 (izquierda) y durante la ocurrencia de un evento extremo en 2008 (derecha).	174
Figura 12. Caudales promedio mensuales para el período 1994 -2008 y su contraste con el año 2009-2010 (línea roja y gruesa) y 2010-2011 (línea naranja y gruesa). Además se indican los años secos 1994 -1995 (línea verde punteada) 1998-1999 (línea corinta punteada) y 2001-2002 (línea negra punteada).	174
Figura 13. Anomalías de la temperatura oceánica (TSO), región 3.4, durante el evento climático El Niño en 2009. Nota: el valor de cero representa el promedio histórico.	175
Figura 14. Índice de El Niño (anomalías de temperatura) para el período 1950 -2010.	176
Figura 15. Precipitación histórica (1994-2008 de estaciones climáticas cercanas a la subcuenca Teculután.	177
Figura 16. Precipitación de las estaciones de bosque seco, bosque de pino encino y bosque nuboso comparadas en los últimos años hidrológicos y el promedio histórico.	177
Figura 17. Caudal promedio histórico durante el período 1996-2011.	179
Figura 18. Caudal medio mensual histórico de la subcuenca Teculután.	179
Figura 19. Apreciación de la diferencia de condiciones generales y caudales entre los años hidrológico 2009-2010 y 2010-2011.	180
Figura 20. Precipitación acumulada en las estaciones El Timbo (bosque nuboso), San Lorenzo (bosque de pino-encino) y El Melón (bosque seco). Análisis comparativo de los años hidrológicos 2009-2010 y 2010-2011.	181
Figura 21. Precipitación acumulada de las estaciones El Timbo (bosque nuboso), San Lorenzo (bosque pino-encino) y El melón (bosque seco) y su relación con los caudales promedio diarios. Años hidrológico 2009-2010 y 2010-2011.	182
Figura 22. Puntos de muestreo de concentración de sedimentos y caudales promedio diarios en la estación de aforo Las Minas, subcuenca Teculután.	184
Figura 23. Modelación de la concentración de sedimentos en función del caudal de la subcuenca Teculután.	184
Figura 24. Precipitación, caudales y erosión modelada para el año hidrológico muy húmedo 2010-2011.	185

Figura 25. Unidades de mapeo de la subcuenca Tecolután. Unidad de mapeo 3: representativa del ecosistema Bosque nuboso. Unidad de mapeo 11: representativa del ecosistema de Pino encino.....	189
Figura 26. Características hidrológicas y climáticas generales de los ecosistemas Bosque nuboso y Bosque pino encino.....	190
Figura 27. Características hidrológicas y climáticas generales de los ecosistemas Bosque nuboso y Bosque pino encino.....	190
Figura 28. Precipitación mensual de los ecosistemas durante un año muy seco.	191
Figura 29. Recarga hídrica mensual de los ecosistemas durante un año muy seco.	191

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Anomalías de precipitación e intensidad máxima diaria de las estaciones climáticas de bosque seco, de pino encino y bosque nuboso, durante los últimos dos años hidrológicos.	178
Cuadro 2. Descripción biofísica general de los ecosistemas con propiedades en la regulación hidrológica de la subcuenca Tecolután	188
Cuadro 3. Intensidades de lluvia diarias y horarias ocurridas en los ecosistemas durante el año 2010.	192
Cuadro 4. Descripción de los servicios de regulación hidrológica definidos para la subcuenca Tecolután	197

Resumen

Es evidente y bien documentada la necesidad de generar instrumentos innovadores y de alta confiabilidad para contribuir al desarrollo sostenible local basado en el conocimiento profundo y gestión de los recursos naturales renovables, tal como el agua. En tal sentido se ha elaborado la presente investigación denominada: Análisis de los servicios ecosistémicos en la subsubcuenca Teculután, mediante el monitoreo ecohidrológico en dos años climáticos extremos. El cual también se constituye en un estudio de caso de la generación de información ecohidrológica detallada en el marco de la gestión de esquemas de valoración de servicios ecosistémicos.

La investigación se llevó a cabo de la siguiente manera: 1) clasificación de zonas hidrológicamente homogéneas en la subcuenca, bajo un enfoque ecohidrológico; 2) recopilación, generación u análisis de información del clima e hidrología de la subsubcuenca, con énfasis en los años hidrológicos comprendidos entre mayo 2009 y abril 2011; 3) se determinó la sedimentación en la subcuenca, y, finalmente, 4) se definieron los servicios de regulación hidrológica de regulación hidrológica en la subcuenca. Esto se considera fundamental para la sustentación y gestión de un esquema de pago o compensación por servicios ambientales implementado en la subcuenca Teculután.

Un aspecto relevante fue la determinación de los años del muestreo como muy seco y muy húmedo. Por ejemplo la anomalía (distancia de la media) en la precipitación anual en el año muy seco fue de -37%. Esto implicó una anomalía de - 50% de caudal. Para el año muy húmedo la anomalía de la precipitación fue del 80% y produjo una anomalía en el caudal anual de 62%. Sin embargo las anomalías mensuales del caudal fueron de -70% en el año seco (octubre 2009). En el año muy húmedo ésta anomalía fue de 270% en el mes de mayo de 2010.

A partir de la información de años extremos se logró evidenciar claramente que el ecosistema de pino encino es crítico para la regulación de crecidas, caudales máximos y erosión durante la estación lluviosa. La parte alta de la subcuenca (equivalente al ecosistema de bosque nuboso) es crítica para la recarga hídrica y regulación del caudal durante la estación seca, observándose esto aún más importante en años hidrológicos muy secos, tal como mayo 2009 – abril 2010.

Se definieron los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica de provisión en la subcuenca y se logró describirlos biofísicamente, así como vincular oferta (ecosistema de ocurrencia) y demandantes (usuario directo del beneficio). De acuerdo a WWF los pobladores de Teculután están dispuestos a pagar y participar activamente por la conservación de los servicios ecosistémicos definidos.

Finalmente se logró definir satisfactoriamente indicadores para la evaluación del estado de los ecosistemas y de efectividad y rendimiento de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica que proveen.

8 Introducción

Ante la disminución de la disponibilidad de los bienes hídricos a escala global, la comunidad científica internacional ha hecho hincapié en la necesidad de nuevas soluciones. Entre estas soluciones destaca el desarrollo y gestión de esquemas de pago o compensación por servicios hidrológicos ambientales a escalas locales.

Estos esquemas deben plantearse bajo las siguientes dudas fundamentales ¿Por qué los métodos actuales de gestión de recursos hídricos no proporcionan resultados satisfactorios? ¿Cuáles son y cómo se miden las dimensiones de servicios ecosistémicos hidrológicos por los que la sociedad está dispuesta a participar activamente en su conservación? ¿Cómo se mide la efectividad y el rendimiento de las inversiones específicas efectuadas?

La generación de información respecto al agua ha estado dominada por un enfoque mecánico-hidráulico, cuando en realidad, lo que es necesario analizar es el ciclo del agua a escala de cuencas fluviales es el resultado de la evolución biogeológica (Zalewski, 2000; Janauer, 2000).

Para resolver las dudas fundamentales es necesario aplicar la ciencia de ecohidrología. Esta ciencia se define como el estudio de las interrelaciones y funcionales entre la hidrología (ciclo hidrológico) y la biota (ecología) a escala de un sistema, generalmente la subcuenca. Esta se constituye en un nuevo enfoque para lograr la sostenibilidad y gestión más adecuada del agua. Se basa en tres principios: a) Integrar y comprender las interrelaciones del agua y la biota a escala de subcuenca; b) entender que evolutivamente se ha establecido una resistencia de los organismos vivos al estrés, sobre todo hídrico y climático, a partir de las cuales pierden su capacidad de resiliencia; y c) uso de propiedades de los ecosistemas como instrumentos de gestión (medición de eficacia de gestión medida por la diversidad biológica, la calidad del agua y cantidad) (Van Dijk, 2003; Zalewski, Ecohydrology — the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources, 2000).

Bajo este marco se ha propuesto la presente investigación, la cual se denominada “Análisis de los servicios ecosistémicos hidrológicos en la subsubcuenca Teculután, mediante el monitoreo ecohidrológico en dos años climáticos extremos”. Presenta en primer lugar los objetivos y un marco metodológico general. A continuación se presentan los resultados y se discuten profundamente, haciendo énfasis en el muestreo hidro-climático del periodo 2009-2010. Asimismo se analizan los caudales, la erosión y la sedimentación, como respuesta al régimen hídrico que se observó durante eventos extremos de precipitación. Posteriormente se desarrolla la fundamentación y definición de los servicios ecosistémicos de regulación.

Entre las principales actividades desarrolladas bajo este marco de trabajo se encuentra el monitoreo del área durante los años hidrológicos:

- a) Año 2009-2010, el cual es considerado como un año muy seco, por lo que se hizo énfasis en el análisis de caudales mínimos durante la estación seca y en el balance hídrico total.
- b) Año 2010-2011, el cual fue muy húmedo, por lo que la atención se centró, fundamentalmente, en tres aspectos: análisis del régimen de respuesta hidrológica del caudal y erosión hídrica resultante.

El hecho de que los años hidrológicos evaluados sean contrastantes y extremos en cuanto a su régimen hídrico se considera una situación oportuna. Este informe constituye un instrumento de integración y análisis de información detallada de clima e hidrología, con un enfoque ecohidrológico y se considerada como fundamental para desarrollar procesos de apoyo al fomento del ordenamiento territorial en la subcuenca Teculután, y puede ser replicado en otras regiones de Guatemala o a nivel internacional.

9 Objetivos

9.1 Objetivo general

Analizar los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en la subsubcuenca Teculután, RBSM.

9.2 Objetivos específicos

- Definir zonas hidrológicamente homogéneas en la subsubcuenca.
- Recopilar información histórica y generar información biofísica exhaustiva, con énfasis en clima e hidrología de la subcuenca, durante dos años hidrológicos comprendidos entre mayo 2009 y abril 2011.
- Conceptualizar y definir servicios ecosistémicos hidrológicos prioritarios así como indicadores de monitoreo y evaluación fundamentales para su gestión sostenible.
- Analizar implicaciones relevantes de la información ecohidrológica generada en la gestión de recursos hídricos en la subcuenca.

10 Metodología.

10.1 Delimitación de ecosistemas hidrológicamente homogéneos

Se delimitaron zonas homogéneas desde el punto de vista hidrológico y climático de la subcuenca. Para tal fin se utilizó el enfoque ecohidrológico, es decir que se analizó la vegetación, ya que éste es el componente del ecosistema más fácilmente reconocible y que se emplea con frecuencia para delimitar unidades o entidades ecológicas homogéneas. Es importante mencionar que las comunidades vegetales y los grupos ecológicos son el resultado de la acción conjunta e integrada de los factores del ambiente, por ello es conveniente utilizarlos como indicadores pertinentes para describir e inferir regímenes hidrológicos a lo largo del gradiente en una subcuenca. En este caso se empleó un gradiente altitudinal.

En tal sentido se validó en campo la propuesta de deducción de ecosistemas hidrológicamente homogéneos ya presentados en el Capítulo II y se procedió a cartografiar los grandes tipos de vegetación para definir los límites de los sistemas ecológicos y por consiguiente las zonas uniformes de la subcuenca Teculután, de acuerdo a los siguientes pasos:

- Recopilación de información secundaria, especialmente estudios ecológicos de la región, tal como: a) Estudio florístico de la comunidad del cipresillo (*Taxus globosa Schlecht*) en los cerros Pinalón, Guaxabajá y Mululjá de Sierra de las Minas (Rosito, 1999); b) estudio florístico de la comunidad de pino encino, río Colorado, Zacapa (Medinilla, 2000). Asimismo se utilizó de referencia la propuesta de Bruijnzeel, 2010 y la información recopilada en capítulos anteriores de esta investigación, para mayor detalle ver Capítulo II de este mismo documento.
- Se realizaron recorridos de la subcuenca siguiendo gradientes altitudinales y definiendo las grandes comunidades vegetales y verificando la presencia de las especies indicadoras (definidas en el Capítulo II).

10.2 Integración de información hidroclimática histórica.

A continuación se describe los pasos llevados a cabo para la integración de información hidrológica y climática para la subcuenca. Los principales pasos fueron la recopilación de información histórica y la generación de información climática, hidrológica y edáfica. Es importante recalcar que las principales variables climáticas e hidrológicas analizadas para los dos años de medición 2009-2011 se determinaron con base en el protocolo de monitoreo hídrico y climático de la subcuenca Teculután (IARNA 2013). A continuación se describen los pasos seguidos.

Los registros climáticos históricos, necesarios para definir tendencias, se obtuvieron de dos fuentes principales:

- h) estación climática Pasabien, ubicada a 260 msnm, datos diarios de precipitación y temperaturas promedio diarias y máximas y mínimas. Está ubicada en el ecosistema bosque seco y está a cargo del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).
- i) Estación climática San Lorenzo, datos diarios de precipitación y temperaturas promedio y máximas y mínimas. Está ubicada en la finca San Lorenzo, ecosistema de pino encino a 1720 msnm y está bajo responsabilidad del Instituto Nacional de Electrificación (INDE)

- j) Estación hidrológica Las Minas, ubicada en la parte baja del río Teculután a aproximadamente 250 msnm. Esta estación permite dos lecturas diarias acumuladas desde 1992 y está bajo responsabilidad del INDE.

10.3 Generación de información ecohidrológica detallada.

A continuación, se describen los procesos de medición climática e hidrológica detallada que se siguió para los años hidrológicos mayo 2009 – abril 2010 y mayo 2010 – abril 2011. Es destacable que la subsubcuenca Teculután está ubicada en la región hidrológica de sotavento.

Medición de datos climáticos, las variables climáticas, temperatura (medida en $^{\circ}\text{C}$) radiación solar (W/m), viento (dirección, ráfagas y velocidad medias en azimut y m/s), humedad relativa (%) y la precipitación (mm) se midieron en estaciones climáticas automatizadas (AWS, por sus siglas en inglés). Dichas estaciones se programaron para tomar datos promedio cada 15 minutos, excepto precipitación ya que los datos son generados por evento.

De acuerdo al enfoque ecohidrológico se ubicó una estación climática completa en cada ecosistema importante en la subcuenca (Figura 1), tal como bosque seco en la parte baja (200-700 msnm), bosque de pino encino en la parte media (700-2100 msnm) y bosque nuboso en la parte alta (2100-2700 msnm), ver Figura 2 y 3. Las estaciones de bosque Seco, ubicada en un sitio denominado Finca Las Marías y la ubicada en el bosque de pino-encino ubicada en el campamento minero San Lorenzo contaban con telemetría, es decir que por medio de sistema GSB (mensajes de texto de teléfono celular) los datos fueron enviados a un servidor que almacenaba los mismos y los ponía disponibles en una plataforma de internet (página web: www.wwfca.or). Es importante mencionar que las dos estaciones del bosque de pino encino y de bosque nuboso no pudieron ser colocadas dentro de la subsubcuenca Teculután por inaccesibilidad y fueron colocadas en la subsubcuenca vecina de Pasabien. Esto también fue útil para poder anclar los datos generados con los datos históricos de la estación San Lorenzo en donde hay registros históricos desde 1992.

Como información de respaldo, en el bosque nuboso se colocaron, además, 2 pluviómetros de medición de intensidad de lluvia y 20 totalizadores de precipitación (Figura 1, 4 y 5) en sitios muy cercanos a la estación AWS. Estos instrumentos fueron útiles para contar con información de respaldo y como referente de la precipitación horizontal. Fue importante contar con información de respaldo debido a que la estación climática AWS, ubicada en el bosque, no contaba con condiciones de seguridad para garantizar la acumulación de los datos durante los dos años de medición.

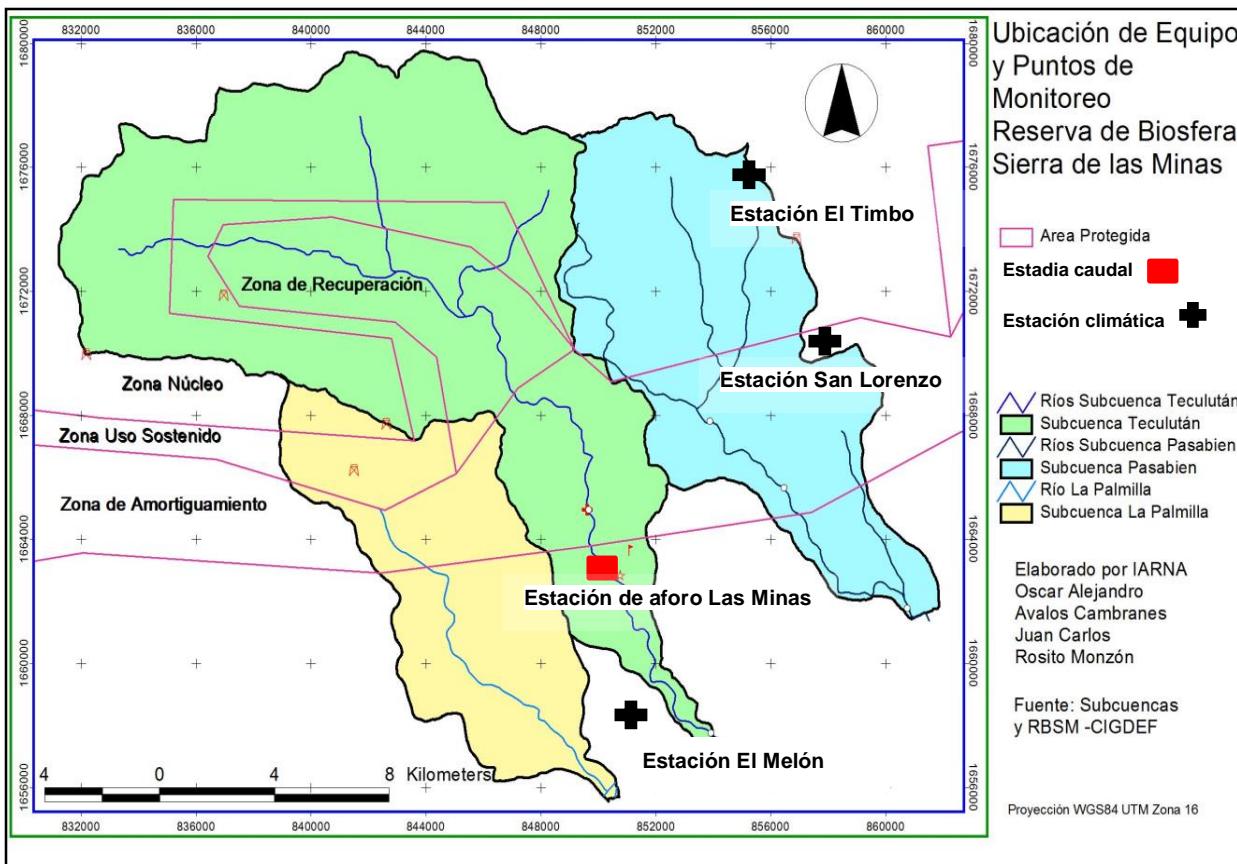


Figura 11. Ubicación de estaciones AWS y medidores de intensidad de precipitación y de caudal de salida en la subsubcuenca Teculután.



Figura 12. Estación El Timbo. Sitio representativo ecosistema bosque nuboso (2300 msnm)



Figura 13. Estación AWS ubicada en campamento minero San Lorenzo (ecosistema de pino-encino, 1750 msnm).



Figura 14. Pluviómetro automático dotado con un balancín para medición de la precipitación, su intensidad y la duración de los aguaceros (izquierda) y totalizadores de precipitación (derecha).

Medición de caudales. Se utilizó la estación de aforo “las Minas” (Figura 1 y 5), cuyo principal instrumento es una estadía (regla para medir la altura del río), se localiza en la parte baja de la subcuenca, cerca del poblado de Teculután, específicamente en la comunidad del mismo nombre, es decir, Las Minas. Los datos fueron tomados dos lecturas diarias, una a las 6:00 horas, en la de la mañana, y la otra a las 12:00 horas (medio día). Es destacable que El Instituto Nacional de

Electrificación (INDE) cuenta con datos históricos altura de flujo superficial (y caudal correspondiente). En tal sentido se utilizó la curva de caudales generada por INDE para este punto de muestreo.



Figura 15. Ubicación de la estación de control de la altura de flujo, control visual, tres lecturas diarias (primera presa ubicada a 30 minutos a pie al norte del poblado Teculután)

Medición de la erosión. Para poder cuantificar la erosión de acuerdo con su naturaleza y fuente, se desarrolló un procedimiento sistemático que implicó una serie de pasos, a saber:

- Muestreo de sedimentos en suspensión. Para ello, se colocaron cada en un tubo de 3 m de alto recipiente con boca de sifón cada 30 cm de altitud. Este equipo fue colocado anclando el tubo en una pared de piedra de tal manera que estuviera expuesto a la corriente del río. Además como respaldo fueron tomadas muestras de agua sistemáticamente cada tercer día a las 7:00 am durante la estación lluviosa y, además, durante cada evento que evidentemente acarreara sedimentos en la corriente del río (Figura 6).
- Las muestras, de volumen conocido, se pasaron por un tamiz o filtro para separar el sedimento. Posteriormente, se pesó la muestra seca para conocer el contenido de sólidos sedimentables.
- Esta información se corroboró por medio de muestras colocadas en conos Imhoff. La concentración obtenida de los sedimentos se relacionó con el caudal medido, determinándose la descarga de sedimentos en ese punto, y de ahí se realizaron las correlaciones matemáticas.
- Los muestreos se realizaron sistemáticamente al menos una vez cada quince días.
- Los muestreos se intensificaron durante las estación lluviosa de 2010, debido a la evidencia de mayor cantidad de sedimentos.
- Los muestreos se realizaron con cada evento de precipitación mayor a 30 mm diarios durante la estación lluviosa. Durante eventos extremos de precipitación (Figura 6) fue necesario tomar una serie de muestras, a medida que aumentara el caudal de tormenta (caudal rápido). Para

ello, se instalaron botellas con sifón en un tubo, con recolectores colocados a cada 10 cm de altura.

- Durante los periodos de estiaje, las mediciones se hicieron quincenalmente. El principal punto de toma de sedimentos se ubicó en la estación de aforo Las Minas.



Figura 16. Muestreo de sedimentación y erosión en el río Teculután, estación hidrológica Las Minas.

10.4 Determinación de servicios de regulación hidrológica prioritarios e indicadores para su evaluación y monitoreo.

Para conceptualizar y definir los servicios hidrológicos prioritarios en la subcuenca Teculután se siguieron los siguientes pasos:

- Se conceptualizó con la mejor información científica disponible los servicios ecosistémicos, haciendo énfasis en su utilidad y en la vinculación de procesos ecológicos con el sistema socioeconómico.

- Se utilizó como instrumento de análisis un ejercicio de contabilidad anual de los recursos hídricos de la subcuenca. Para tal fin se integró en un marco analítico (matriz) la disponibilidad, flujos, demanda (y sus respectivos usuarios) y estado de recursos hídricos en la subcuenca. Un aspecto destacable fue la determinación específica de los demandantes y la cuantificación anual del uso consuntivo de recursos hídricos provenientes de la subcuenca.

Para la definición de indicadores de evaluación y monitoreo de la gestión de la subcuenca, se desarrollaron los siguientes pasos:

- Se realizó una síntesis de la caracterización de los años hidrológicos (caudales) extremos para el año hidrológico muy seco (2009-2010) y muy húmedo (2010-2011). Se revisaron estudios de demandas de agua de los sistemas de riego (WWF, 2008) y estimaciones de otros usos de los recursos hídricos.
- Basados en la información científica integrada y generada se discuten implicaciones y recomendaciones para implementar un sistema de gestión de los servicios de regulación hidrológica en la subcuenca Teculután.

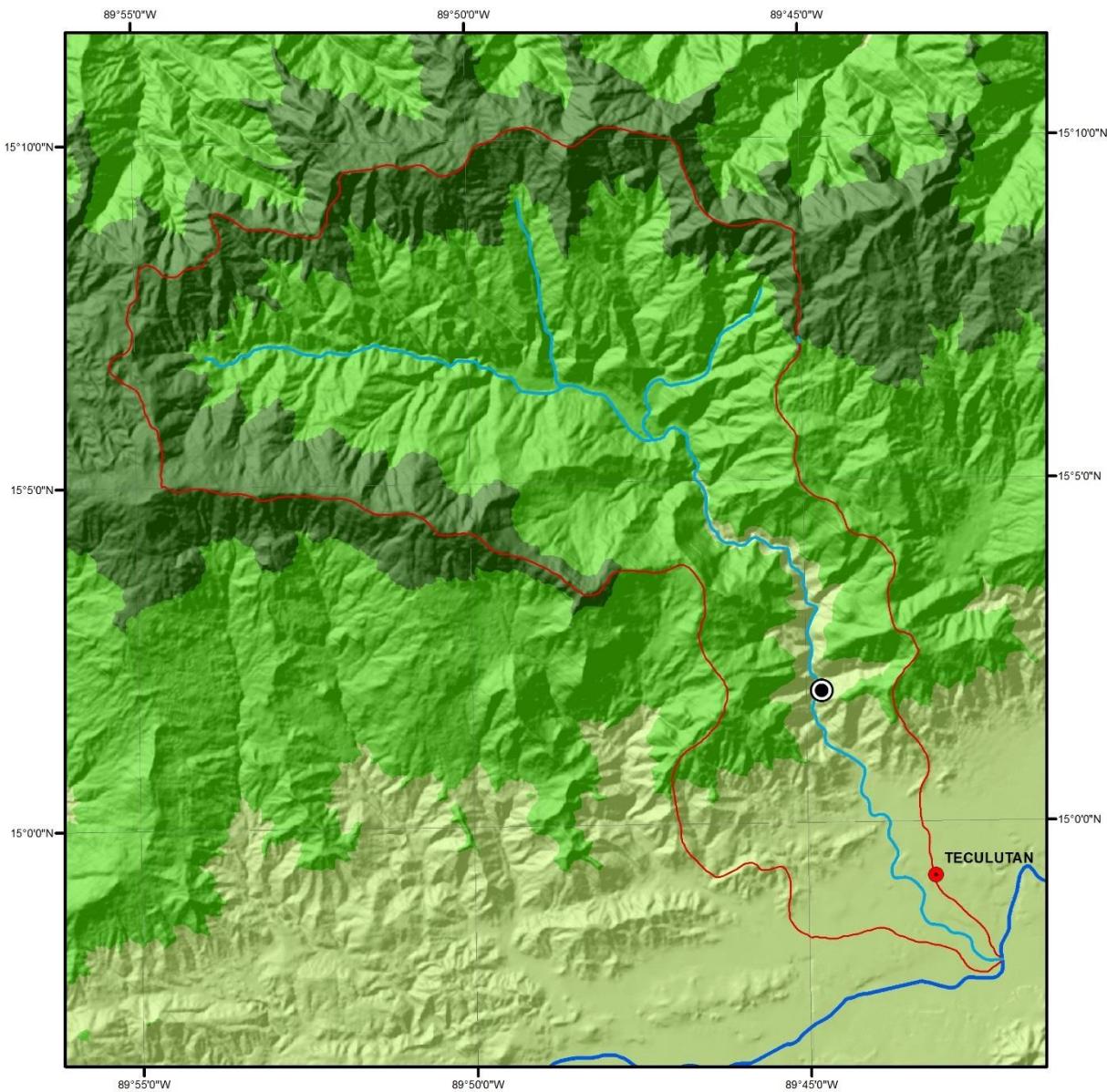
11 Resultados y discusión.

11.1 Síntesis de la clasificación de zonas hidrológicamente homogéneas bajo el enfoque ecohidrológico.

De acuerdo a la revisión de estudios ecológicos, análisis de referentes como (Bruijnzeel, Scatena, & Hamilton, 2010) y verificación de campo de la vegetación de ecosistemas presentes en la subcuenca se delimitaron tres estratos altitudinales, ordenándolos desde la parte inferior a la superior, de la manera siguiente:

- a) Bosque seco, entre 250 y 800 msnm. Presencia de especies xerofíticas, con topografía plana a ligeramente inclinada. Las especies dominantes e indicadoras son xerofíticas, entre las que se pueden mencionar *Haematoxylon brasileto*, *Guaiacum sanctum*, *Nopalea guatemalensis*, *Caesalpinia velutina* y *Pilosocereus leucocephala*. Características topográficas, relieve plano a ondulado con pendientes promedio menores a 50%. Suelos arenosos entre poco profundos (menos de 10 cm de profundidad) y medianamente profundos (entre 10 y 50 cm).
- b) Bosque de pino y encino, entre 800 y 2,100 msnm. Predominancia de especies de pinos y encinos, suelos poco profundos y observancia predominante de altas pendientes. Entre las principales especies, indicadoras y dominantes, se mencionan: *Quercus peduncularis*, *Pinus oocarpa*, *P. tecunumanii*, *P. maximinoi*, *Leucothoe mexicana*. Características topográficas, relieve muy escarpado con pendientes promedio mayores a 50%. Suelos arenosos y fracos generalmente poco profundos (menos de 10 cm de profundidad) y medianamente profundos (entre 10 y 50 cm). Presencia de zona de descarga hídrica.
- c) Bosque nuboso, desde 2,100 hasta casi 3,000 msnm. Bosque latifoliado con presencia de helechos arborecentes, musgos y epífitas, con suelos profundos o poco profundos en las cumbres y altos índices de diversidad florística. Entre las principales indicadoras y dominantes destacan: *Quercus oliganthus*, *Q. sapotaefolia*, *Podocarpus eloifolius*, *Zanthoxylon limoncello*; *Pinus hartwegii*; *P. ayacawite*; *Nectandra sp*. Características topográficas, relieve ondulado con pendientes promedio de 50%. Suelos arcillosos o fracos, generalmente profundos (mayores a 50 cm de profundidad), en las cimas suelo con roca granítica expuesta. *Este ecosistema coincide con el ecosistema categorizado en la literatura científica de ecohidrología como Upper Mountain Cloud Forest (UMCF)*

En la Figura 7 se puede apreciar un mapa de la distribución geográfica de estos ecosistemas. Cabe recalcar que estos ecosistemas son un indicador de las condiciones más o menos homogéneas de clima, hidrología y suelos de los sitios en estudio.



Vicerrectoría de Investigación y Proyección -VZIP- Universidad Rafael Landívar -URL- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente -IARNA- Fondo Mundial para la Naturaleza -WWF-	Ubicación de estaciones AWS y de caudal de salida de la cuenca Teculután
Leyenda	
	<ul style="list-style-type: none"> ● Centro Poblado ● Punto Aforo ↗ Río Motagua ↗ Río Teculután ■ Cuenca Teculután
	<ul style="list-style-type: none"> Pisos Altitudinales ■ Bosque seco (0 - 800 msnm) ■ Bosque Pino Encino (801 - 2,100 msnm) ■ Bosque nuboso (2,101 - 4,201 msnm)
   Proyección mapa digital: GTM, Datum WGS 1984 Proyección mapa impreso: coordenadas geográficas, esferoide 1964	Fuente: MAGA, IGN Edición: Laboratorio SIG IARNA Guatemala, septiembre 2012

Figura 17. Delimitación de los ecosistemas hidrológicamente homogéneos en la subcuenca Teculután.

11.2 Monitoreo ecohidrológico del período mayo 2009 – abril 2011.

Se realizó una recopilación de datos históricos de variables de análisis más importantes, tanto climáticos, especialmente precipitación y temperatura, así como hidrológicos, especialmente caudales; necesarios para la descripción hidrológica de los dos años evaluados para su clasificación hidrológica. A continuación se presenta la integración de la información histórica como referente para la categorización del año hidrológico de acuerdo al régimen de humedad que presentó. Posteriormente se analizan los datos generados a partir del muestreo exhaustivo realizado de mayo 2009 a abril 2011.

11.2.1 Año hidrológico mayo 2009-abril 2010.

El año hidrológico mayo 2009-abril 2010, se definió como un periodo muy seco, ya que se observó una precipitación equivalente al 50% de la lluvia promedio anual histórica (últimos 20 años), probablemente como resultado de la influencia directa del fenómeno climático El Niño, fase cálida. Como consecuencia, la hidrología del río Teculután se documentó como un año muy seco, incluso se registraron los caudales más bajos para la estación seca, al menos, durante los últimos 20 años. Los caudales mínimos demarcaron un severo déficit, si se considera que el caudal promedio mensual para uso consuntivo (agricultura y hogares) es de $2\text{m}^3/\text{s}$, y el promedio mensual en abril de ese año (uno de los meses de mayor demanda) fue de alrededor de $1\text{ m}^3/\text{s}$. En tal sentido es destacable que para ese periodo no se observaron eventos significativos de erosión.

Se consideró importante comparar y validar los resultados de precipitación de la estación Las Marías con datos históricos de estaciones con condiciones climáticas similares, como la estación Pasabién, que se encuentra a pocos kilómetros al noreste del poblado de Teculután. Tanto los datos de días de precipitación, como de cantidad precipitada estuvieron por debajo del promedio entre 1994 y 2000. Por tanto, el año hidrológico 2009-2010 se confirma como un año seco (Figura 8).

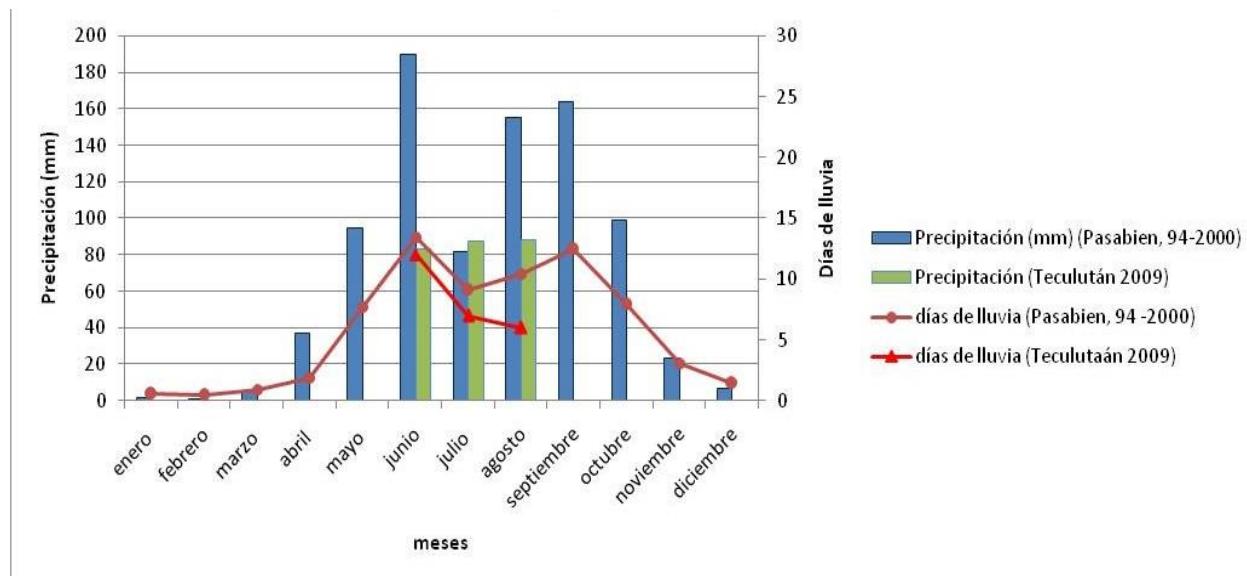


Figura 18. Relación entre la precipitación anual y días de precipitación de la estación de Pasabién (1994-2000) y Teculután (2009-2010) ubicadas en el bosque seco.

Uno de los efectos más importantes evidenciados para una año seco es la ausencia de erosión. Para explicar esto debe comprenderse la interacción entre la precipitación y las características hidráulicas de los suelos. En la Figura 9 se presenta una síntesis e idealización de las características físicas e hidráulicas de los suelos. Se obtuvo los datos de las características físicas e hidráulicas de los suelos del estudio de balances hídricos realizado para tal fin. En el extremo izquierdo (ecosistema de bosque nuboso) se muestra que el suelo es bastante profundo (1.5 m en promedio). En la parte central la idealización de los suelos del ecosistema de pino-encino con una profundidad promedio de 40 cm. En la parte derecha se presenta las características del bosque seco con 20 cm de profundidad en promedio.

Otros indicadores son: cc: Capacidad de campo (CC), la cual oscila alrededor del 22% para los diferentes suelos y un Punto de marchitez permanente (PMP), la cual está alrededor del 10% en volumen. IB: Infiltración básica, es decir la conductividad hidráulica de los suelos en condiciones de saturación, que puede ser medido en lámina de agua por unidad de tiempo, por ejemplo mm/hora. Este valor es indicado en la gráfica para cada suelo. Estos valores fueron obtenidos a partir de un muestreo realizado en el proceso de determinación de un balance hídrico de suelos y validados mediante el modelo SPAW, el cual fue utilizado como referente (<http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/Index.htm>). Estos datos son una referencia debido a la importancia de contar con información empírica para verificar el método gráfico utilizado.

Es básico considerar que la erosión es resultado de la escorrentía superficial que ocurre cuando se ha rebasado la capacidad del suelo de infiltrar (o absorber) el agua. Como se evidencia, las lluvias para ese año hidrológico escasamente superaron el umbral necesario para la ocurrencia de erosión, ya que no se presentó escorrentía superficial espontánea. Es decir prácticamente no se registró erosión natural o sedimentación en la parte baja de la subcuenca, ya que los suelos han permanecido en valores cercanos al nivel de punto de marchitez permanente.

Este esquema físico-climático-hidráulico es similar al del ecosistema de bosque de pino-encino, pero la diferencia es que en el ecosistema de bosque seco se infiere que sí ha habido erosión, según las intensidades de lluvia observadas en el ciclo hidrológico anual, debido a que las intensidades máximas de lluvia han sido altas y la profundidad de los suelos es muy baja.

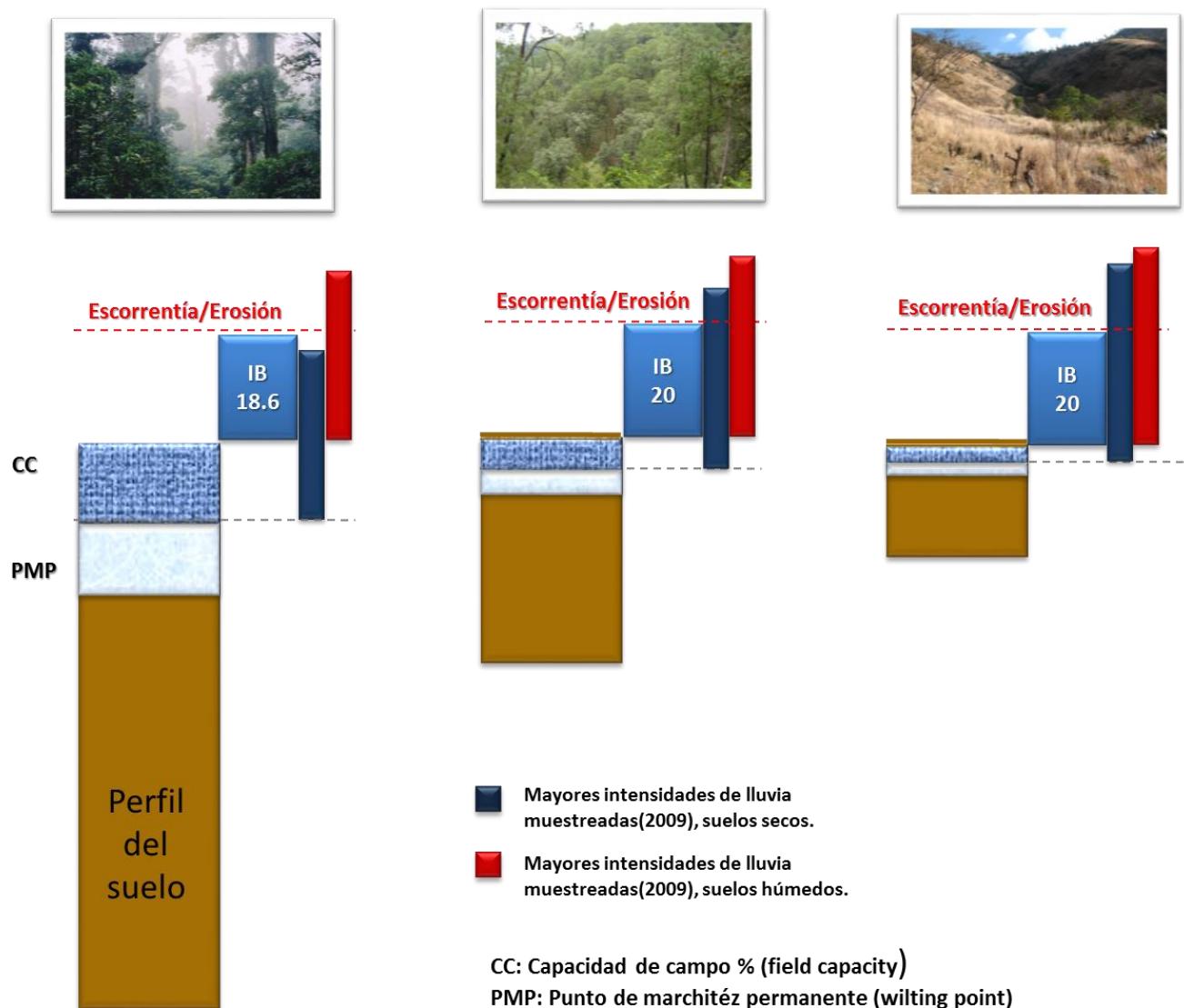
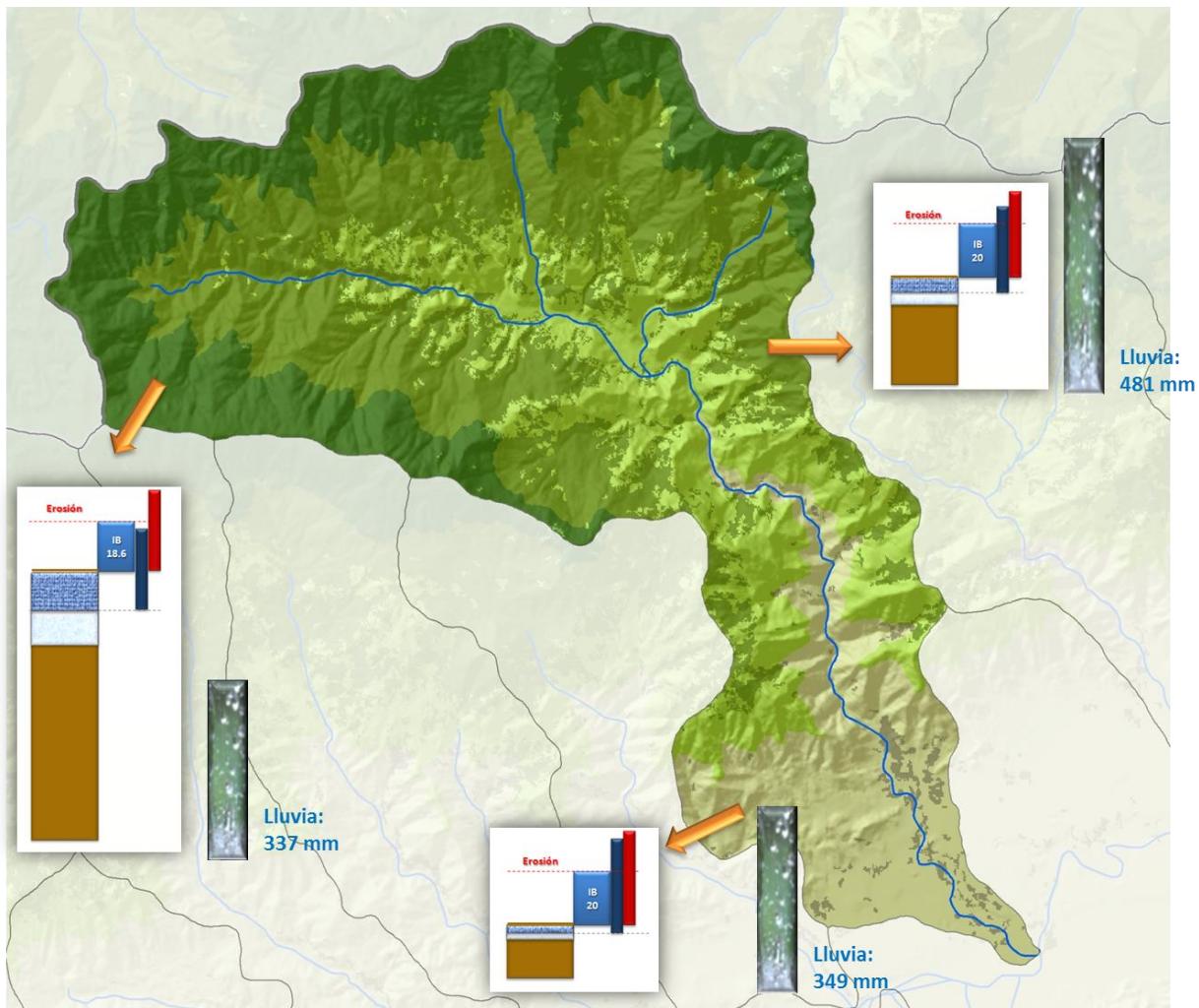


Figura 19. Relación conceptual entre intensidades de precipitación ocurridas en el año hidrológico 2009-2010 y la ocurrencia de escorrentía y erosión, de acuerdo a la infiltración básica (IB) representativas y a condiciones de Capacidad de Campo (CC) y Punto de Marchitez Permanente (PMP).

La Figura 10 muestra la distribución de las características físicas, hidráulicas y edáficas, de acuerdo con su ubicación en la subcuenca Tecolután. La barra representa la cuantificación de la precipitación total hasta junio de 2009. Mayo y junio fueron los meses más lluviosos. Se puede deducir que en el primer trimestre de la estación lluviosa las mayores intensidades de lluvia se presentaron en el bosque seco, y la mayor cantidad de precipitación en el bosque de pino encino. Llama la atención que las menores intensidades de lluvia y la menor cantidad de precipitación ocurrieron en el bosque nuboso.



¹ Columna azul: punto de marchitez permanente (suelos secos). Columna roja: capacidad de campo (suelos saturados).

² Infiltración básica (columna azul claro).

³ Línea roja punteada.

Figura 20. Relación de la lámina de intensidad máxima horaria observada y la lámina necesaria para la ocurrencia de escorrentía o erosión y las láminas de lluvia en el trimestre más lluvioso del años 2009-2010.

También llama la atención que al estar los suelos con valores cercanos a la capacidad de campo, es decir saturados, es en las partes medias y baja de la subcuenca, los sitios con muy altas probabilidades de presentar escorrentía y, consecuentemente, erosión de suelo. En las Figuras 11 y 12 se puede apreciar que los años hidrológicos son de alta variabilidad interanual; por lo general, después de un periodo seco se presenta otro con altas precipitaciones. Por otro lado, se comprueba que el ciclo hidrológico 2009-2010 es el más seco en más de 15 años de monitoreo hidrológico de la subcuenca. En ese año se registraron los caudales promedio más bajos para agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre, febrero, marzo y abril, es decir ocho meses (75%) del año hidrológico.



Figura 21. Comparación de la apariencia del caudal en la estación de aforo durante el 2009 (izquierda) y durante la ocurrencia de un evento extremo en 2008 (derecha).

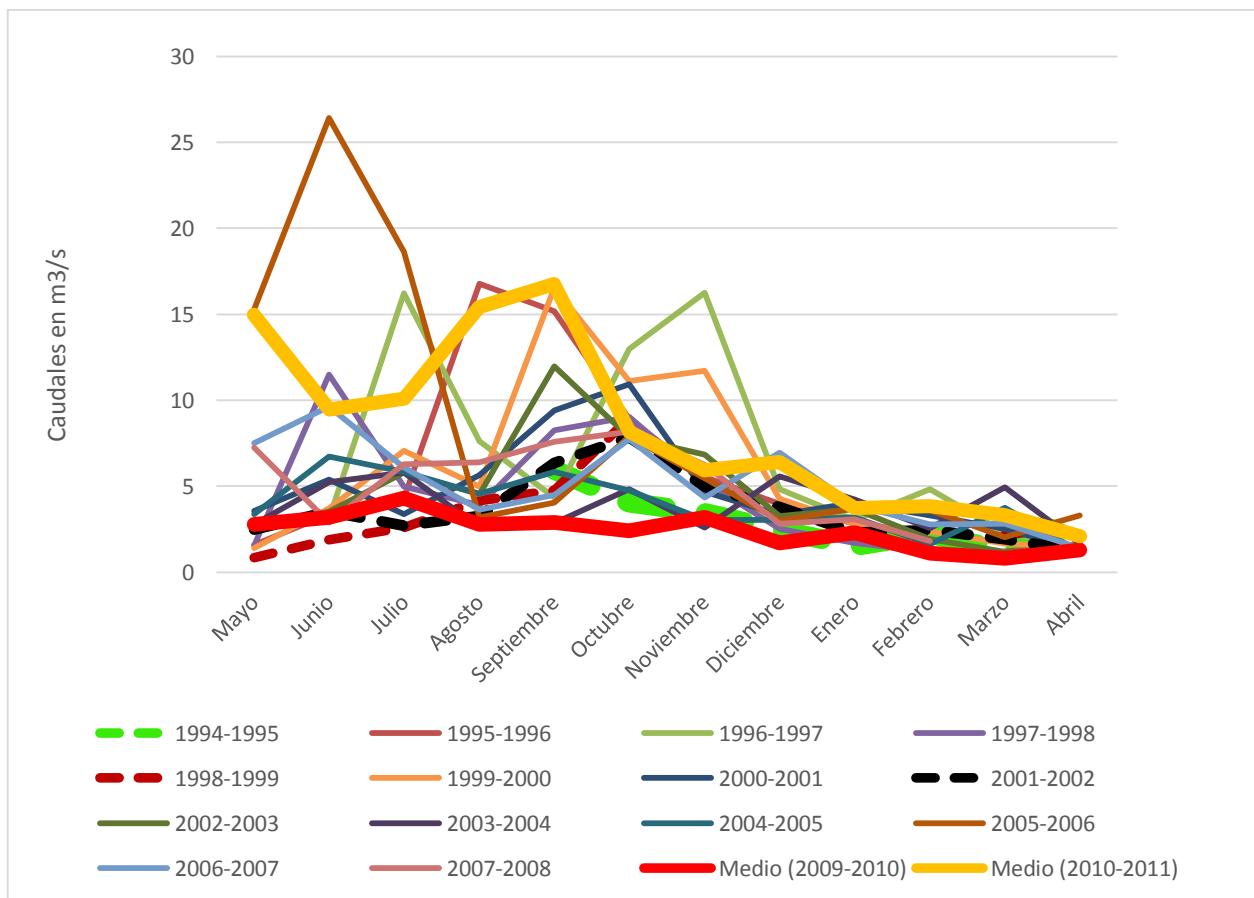
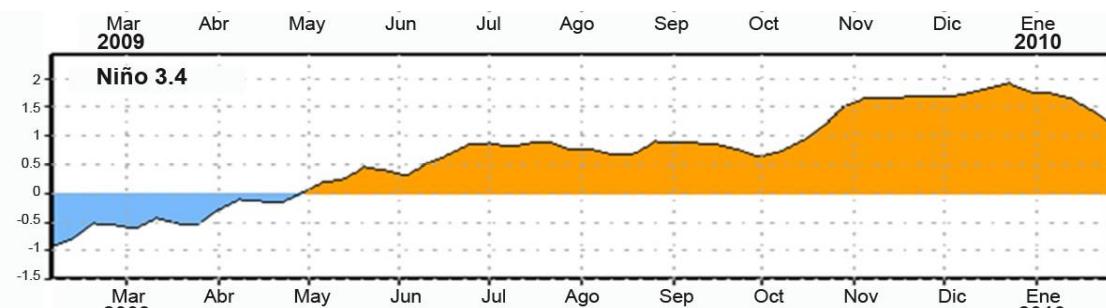


Figura 22. Caudales promedio mensuales para el período 1994 -2008 y su comparación con los años hidrológicos 2009-2010 (línea roja y gruesa) y 2010-2011 (línea naranja y gruesa) y años secos 1994 -1995 (línea verde punteada) 1998-1999 (línea corinta punteada) y 2001-2002 (línea negra punteada)

Es importante mencionar que se puede relacionar la influencia del fenómeno físico-climático global Oscilación del Sur El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés) o simplemente El Niño. Éste último se caracteriza por anomalías que exceden 1 °C los promedios históricos en el Océano Pacífico ecuatorial (Figura 13). Al tratar de explicar la relación de la sequía con la formación del EL Niño se compararon los datos del año hidrológico 2009-2010 con el fenómeno climático global (Figura 13) y se puede apreciar disminución significativa de caudales (debajo del promedio mensual) y la formación de El Niño al exceder la anomalía de temperatura arriba del umbral definido.

Asimismo se relacionaron los datos de caudales históricos observados en la subcuenca Tecolután (Figura 12) con los índices de intensidad del fenómeno climático global (Figura 14) en para el período 1994-2010. Se evidenció que si existe una correlación positiva entre la ocurrencia de los índices más altos de El Niño con la disminución significativa de caudales en Tecolután, esto es más evidente para los años hidrológicos 1994-1995, 1998-1999, 2001-2002 y 2009-2010. Esto sucede durante la estación lluviosa y se exacerbaba especialmente durante la estación seca, de febrero a abril. Por tanto, se deduce que existe una relación directa entre dicho fenómeno y las manifestaciones climáticas e hidrológicas de sequía en la subcuenca Tecolután. Es destacable que para el período para el período de monitoreo de caudales 1994 a 2011 (16 años) se ha evidenciado la ocurrencia de 4 Niños muy intensos (anomalía superior a 1.2 °C), es decir que se puede estimar un período de retorno de cuatro años



Fuente: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>

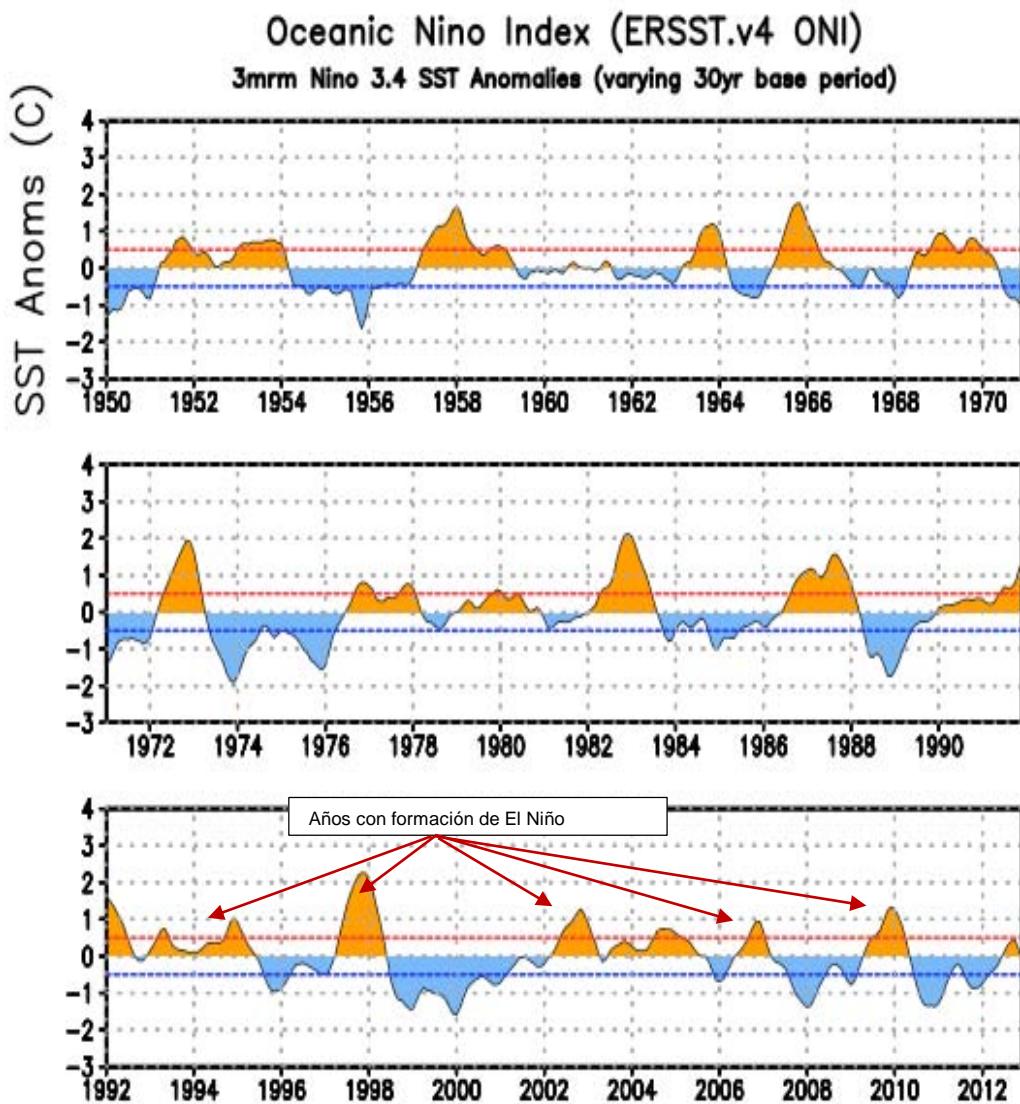
Figura 23. Anomalías de la temperatura oceánica (TSO), región 3.4, durante el evento climático El Niño en 2009, de acuerdo al índice Oceanic Niño Index (ONI).
Nota: el valor de cero representa el promedio histórico.

De acuerdo con las tendencias del fenómeno El Niño, es previsible que los eventos extremos climático/hidrológicos ocurran cada vez con mayor frecuencia. Los registros históricos presentados en la Figura 14 muestran que en veinte años (1950-1970), ocurrieron dos eventos de El Niño con una anomalía superior a 1 °C, es decir cada cinco años. En el período de 1970 a 1990, los números para El Niño se duplicaron a cuatro, es decir, un evento cada cinco años. En el período de 1990 a 2010 los eventos fuertes de El Niño aumentaron considerablemente a seis (es decir un evento cada tres o cuatro años).

11.2.2 Años hidrológicos 2010 - 2011 y 2009-2010.

Contrastantemente al año hidrológico 2009-2010, el año hidrológico mayo 2010-abril 2011 puede ser catalogado como un período muy húmedo. Para definir esto se analizaron los datos de lluvia.

En la Figuras 15 se observa que la precipitación promedio histórica de la estación climática ubicada en el bosque de pino-encino (llamada San Lorenzo ubicada a 1750 msnm), es de 1,486 mm y en Pasabien (250 msnm) de 775 mm. Es destacable que en Pasabien en promedio llueve el 51% de lo que llueve en San Lorenzo. Además se observa un patrón bimodal de la lluvia.



Fuente: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>

Figura 24. Ocurriencia de El Niño de acuerdo al índice ONI (Oceanic Niño Index) para el período 1950 -2012.

Nota: el promedio histórico se representa con 0 en el eje x y la anomalía en eje °C.

Es destacable que para el año hidrológico 2010-2011 la precipitación en la Estación San Lorenzo fue de 2,821 mm, es decir un 83% superior a la precipitación promedio histórico (1992-2010). Un patrón muy similar se observó en la estación climática del bosque seco (Figura 16). Como se muestra en la Figura 16, la precipitación del año hidrológico 2010-2011 casi triplica la precipitación registrada en el periodo 2009-2010, en las tres estaciones evaluadas (bosques, seco pino-encino y nuboso). Esto puede definir a este periodo climático como muy húmedo. De acuerdo con lo

evidenciado anteriormente respecto a la ocurrencia de pocas lluvias y disminución significativa de caudales con la ocurrencia de El Niño. Al realizarse un análisis similar para el año hidrológico 2010-2011 se correlacionó la influencia del fenómeno climático La Niña (anomalía en el Pacífico ecuatorial de 1°C debajo del promedio histórico) con la ocurrencia de un año muy húmedo para el período 2010-2011. Es notoria también la ocurrencia de la Niña inmediatamente posterior a la ocurrencia de El Niño, lo que se puede calificar como un efecto de rebote del año hidrológico muy seco que le antecede. Este patrón también se ha documentado en otros años, por ejemplo 1974, 1988-1998 (ver Figura 14).

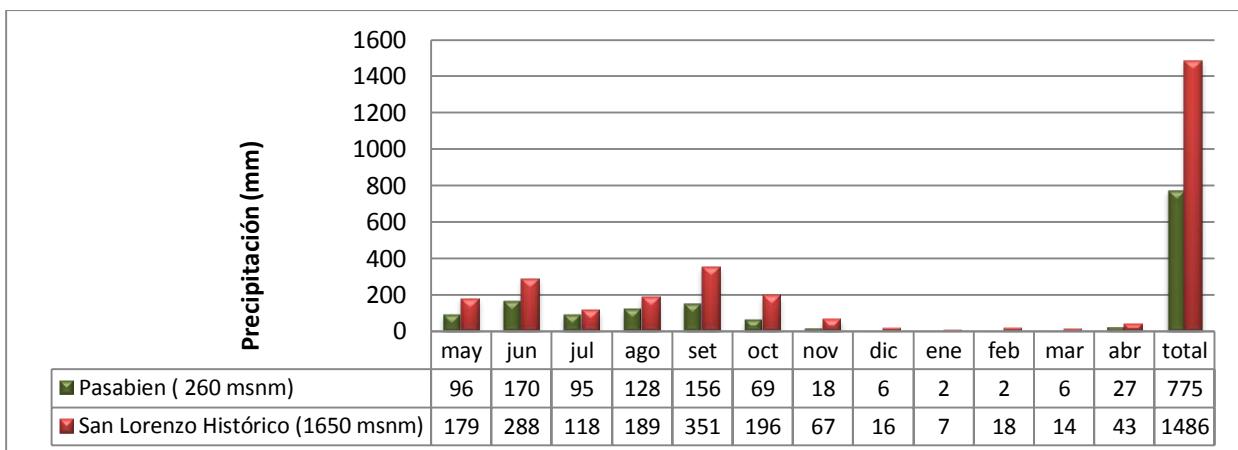


Figura 25. Precipitación del período 1994-2008 de estaciones climáticas Pasabien y San Lorenzo, cercanas a la subcuenca Tecolután.

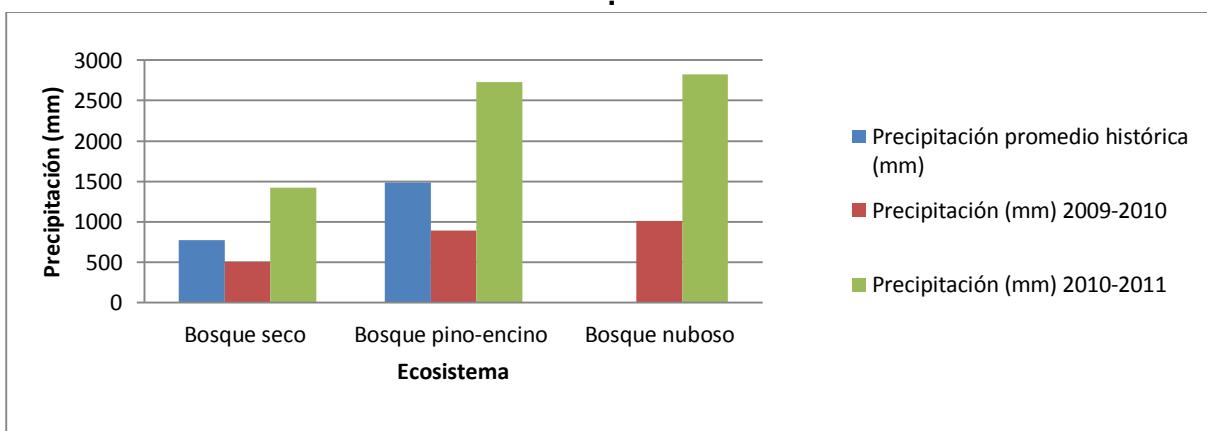


Figura 26. Precipitación de las estaciones de bosque seco, bosque de pino encino y bosque nuboso comparando datos históricos promedio con los totales para los años hidrológicos 2009-2010 y 2010-2011.

Uno de los principales efectos de la ocurrencia de un año muy húmedo es el cambio en los patrones de la lluvia. En el Cuadro 1 se puede apreciar que las lluvias en el año 2010-2011 presentan una anomalía anual (distancia de una medición de una variable respecto de la media) mayor al 80% en los ecosistemas seco y de pino encino. Además se evidenció el cambio de

intensidades horarias y diarias. Estas se incrementan notoriamente entre un año seco y uno muy húmedo para los tres ecosistemas definidos. Contrario a lo que se esperaba, las máximas intensidades diarias se dan para el bosque de pino-encino de 148 mm en un día. De igual manera la intensidad máxima horaria es de 74 mm. Ambas pueden considerar muy altas y, eventualmente, generadoras de altos niveles de escorrentía y erosión, si consideramos que los valores representativos para este ecosistema son de infiltración básica son de 20 mm/hora.

Cuadro 9. Precipitación anual promedio histórica y precipitación, anomalías e intensidades máximas diarias de las estaciones climáticas de bosque seco, de pino encino y bosque nuboso, durante los años hidrológicos 2009-2010 y 2010-2011.

Estación	Precipitación anual promedio histórica (mm)	Precipitación anual en años extremos (mm)	Anomalía de precipitación en año extremo %	Intensidad máxima diaria (mm/día) en año extremo	Intensidad máxima diaria (mm/hora) en año extremo
Bosque seco (2009-2010)	775	506	-34.7	59.1	42.2
Bosque seco (2010-2011)	775	1,420	83.2	84.4	43.5
Bosque pino-encino (2009-2010)	1,486	890	-40.1	72.6	51.4
Bosque pino-encino (2010-2011)	1,486	2,725	83.4	148.2	74.4
Bosque nuboso (2009-2010)		1,014		46.2	32.2
Bosque nuboso (2010-2011)		2,821		108	56.3

Llama la atención que intensidades relativamente bajas se presentan en el bosque nuboso, siendo estas de 32 mm/hora para el año muy seco y de 56 mm/hora para un año muy lluvioso. Como consecuencia de las lluvias con altas intensidades y variabilidad interanual anteriormente descritas, los caudales para estos años hidrológicos se encuentran entre los más contrastantes (en dos años seguidos) durante los años monitoreados.

En la Figura 17 se comparan los caudales promedio anuales de la subcuenca, tomando en consideración los años que tenían datos completos. Durante los años evaluados, se observa que el caudal promedio anual más bajo ($2.4 \text{ m}^3/\text{s}$) corresponde al año hidrológico 2009-2010, y el más alto ($8.35 \text{ m}^3/\text{s}$) al año hidrológico 2010-2011. Ambos datos difieren considerablemente del caudal promedio anual, que es de aproximadamente $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Si se define que un año húmedo es aquel que sobrepasa la media de precipitación anual y el caudal medio mensual es de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ en uno o más meses. Este último valor se ha alcanzado en cinco años hidrológicos durante un periodo total de 15 años: 1995-1996, 1996-1997, 1999-2000, 2004-2005 y 2010-2011. Es decir, que por cada tres años se ha observado un año húmedo incrementando, por ejemplo, las probabilidades de que se presenten eventos de erosión elevada, cuya tendencia se confirma con el análisis del último año hidrológico (Figura 18).

En la Figura 18 se observa para el año 2010 las lecturas más elevadas para el período de marzo a noviembre. De ello se infiere que es el año en que más volumen de agua ha pasado por el punto de aforo, esto es evidente al observar que la curva es mucho más ancha ese año. Contrastantemente para el año 2009 el caudal mensual más bajo de los años monitoreados, siendo este de cerca de $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de abril. Lo anterior evidencia una alta variabilidad interanual mostrada en los años evaluados, definiéndolos como años extremos.

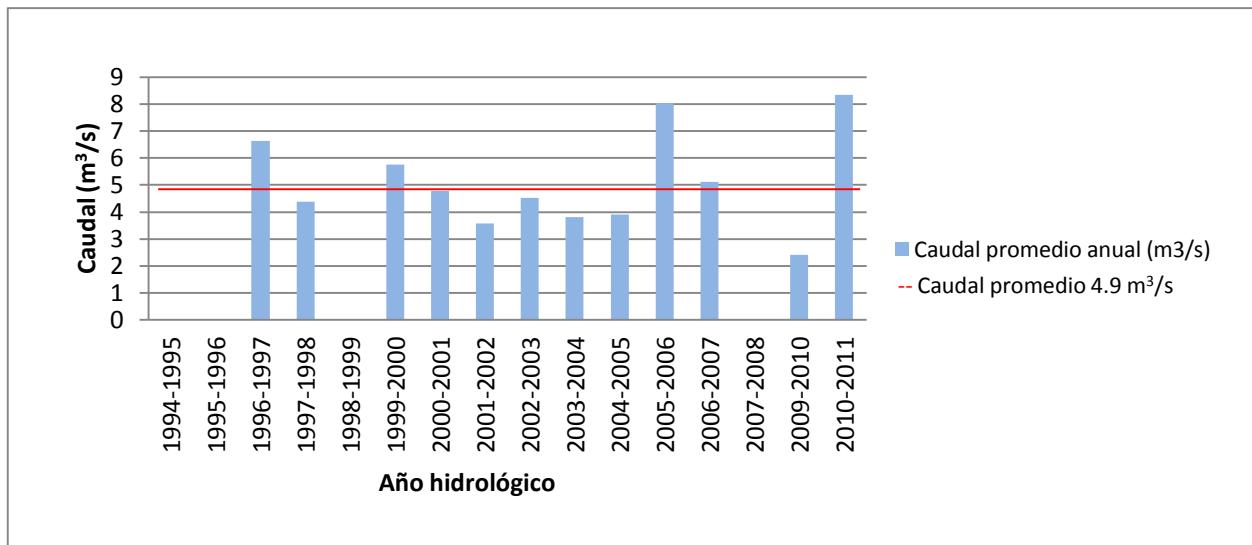


Figura 27. Caudal diario promedio mensual para el período 1996-2011.

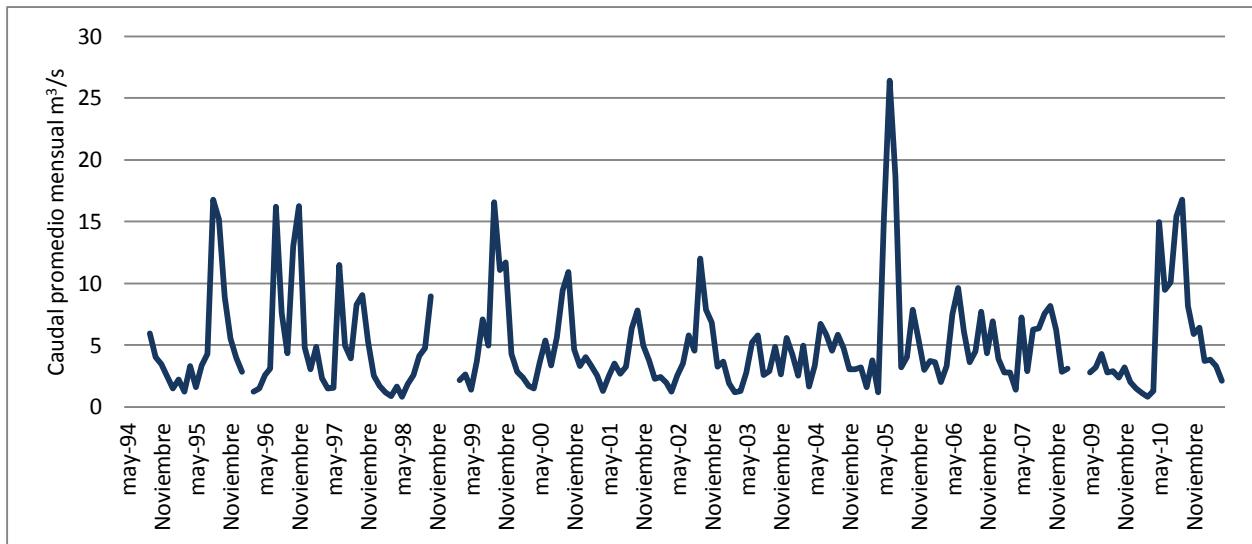


Figura 28. Caudal diario promedio mensual histórico de la subcuenca Teculután m^3/s .

Un aspecto relevante para comprender la variabilidad interanual fue la relación entre las anomalías de precipitación y sus efectos en los caudales para los años extremos evaluados (Cuadro 1). La anomalía en la precipitación en el año muy seco fue de -37% de lluvia comparado con al promedio histórico. Esto implicó una anomalía de - 50% de caudal relativo al promedio anual histórico. Asimismo la anomalía de la precipitación fue del 80% y produjo una anomalía en el caudal anual de 62%. Sin embargo al analizar las anomalías a escala mensual se mostraron aún mayores. Se presentaron meses con -70% (octubre 2009 del año seco), es decir que el caudal fue 70% menor que el caudal promedio histórico del mes de octubre. En el año muy húmedo ésta anomalía fue de 270% para el mes de mayo de 2010. Lo anterior sugiere una amplificación hidrológica de la subcuenca Teculután de los años climáticos extremos, en la que si llueve 35% menos pero el caudal es 50% menor al promedio (año seco). En el año muy húmedo llueve 65% más pero hay meses que muestran una anomalía de cerca del 270% (Figura 19).

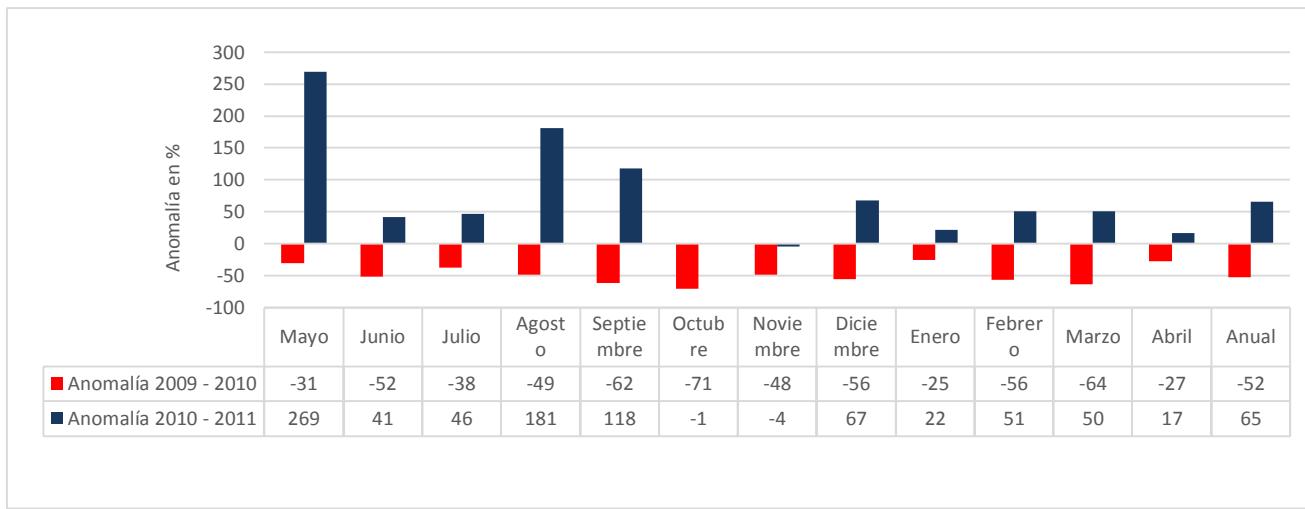


Figura 29. Anomalías en porcentaje de los caudales de los años hidrológicos 2009-2010 y 2010-2011 respecto a la media histórica de caudales (1994-2010)

Integrando el conocimiento anterior se puede afirmar que para la definición de servicios de regulación hidrológica es necesario considerar la variabilidad hidrológica interanual. El déficit hídrico, especialmente durante la estación seca y al final de la estación lluviosa, se relacionan con años hidrológicos secos. El análisis de crecidas extremas del río Tecolután, las cuales se pueden vincular a procesos de erosión, inundaciones y destrucción de infraestructura, especialmente durante estos años húmedos. Los datos de campo sugieren que de estos eventos extremos de precipitación están relacionados con años hidrológicos muy húmedos (vinculados con el fenómeno climático la Niña) o eventos ciclónicos, como huracanes, tormentas, etc. los cuales tienen mayor probabilidad de ocurrir o están asociados a los años muy húmedos.

11.2.3 Precipitación de los años hidrológicos 2009-2010 y 2010-2011 y su relación con la escorrentía superficial y la erosión en la subcuenca.

De acuerdo con los acápite anteriores, es fundamental profundizar en el análisis de la precipitación y su vinculación con los caudales en los años hidrológicos evaluados. A continuación, se presenta la descripción y el análisis de esta variable climática y su relación con la respuesta hidrológica de la subcuenca, especialmente, caudales, la escorrentía superficial espontánea y la erosión, así como el impacto del proyecto PESH.

a) Precipitación

Como se puede apreciar en la Figura 20 y el Cuadro 1, en los períodos hidrológicos evaluados las lluvias son contrastantes (extremas) y representan por un lado años muy seco (2009 y 2010) o muy húmedo (2010 -2011). Entre las principales características que muestran las estaciones climáticas están las altas intensidades al inicio de las lluvias que, para el caso de 2009 ocurrieron a finales de mayo, y para el año 2010 desde abril, con mayor fuerza durante mayo y junio. Las mayores intensidades de lluvia y el mayor volumen de precipitación (2,500 mm en cinco meses de lluvia), se registraron en la estación San Lorenzo, con los siguientes datos:

- 72.2 mm de máximas intensidades horarias,
- Cerca de 150 mm de lluvia máxima diaria,
- Cerca de 200 mm lluvia acumulada en dos días (año) húmedo,

- Lluvia acumulada mensual (más de 750 mm en el mes de junio) y a lo largo de la estación lluviosa mayo-octubre.

En esta misma estación de monitoreo climático, durante la estación lluviosa de mayo-octubre, también presenta el mayor volumen de precipitación, registrándose 2500 mm principalmente en seis meses. Este dato de precipitación anual es similar al de bosque nuboso, sin embargo en este ecosistema con menores intensidades, horarias, diarias y de duración de la estación de lluvias (más de 10 meses).

En este sentido se hace evidente el papel crítico del ecosistema de bosque pino encino en la regulación de los eventos que mayor erosividad presentan en la subcuenca. Por lo tanto es el ecosistema que se estudiará con mayor exhaustividad en cuanto a su respuesta en caudales y la correspondiente erosión, aunque con mayor énfasis en el año húmedo. Es destacable que un patrón de intensidades máximas de lluvia se observó para el año seco, obviamente con menores precipitaciones totales. Cabe destacar que las mayores intensidades horarias y diarias de precipitación coinciden con el inicio de la estación lluviosa (mayo y junio), justo cuando se presenta el fenómeno denominado lluvias convectivas. Es evidente el papel crítico del ecosistema de bosque pino-encino en la regulación de los eventos que causan más erosión en la subcuenca. Las mayores intensidades horarias y diarias de precipitación coinciden con el inicio de la estación lluviosa (mayo y junio).

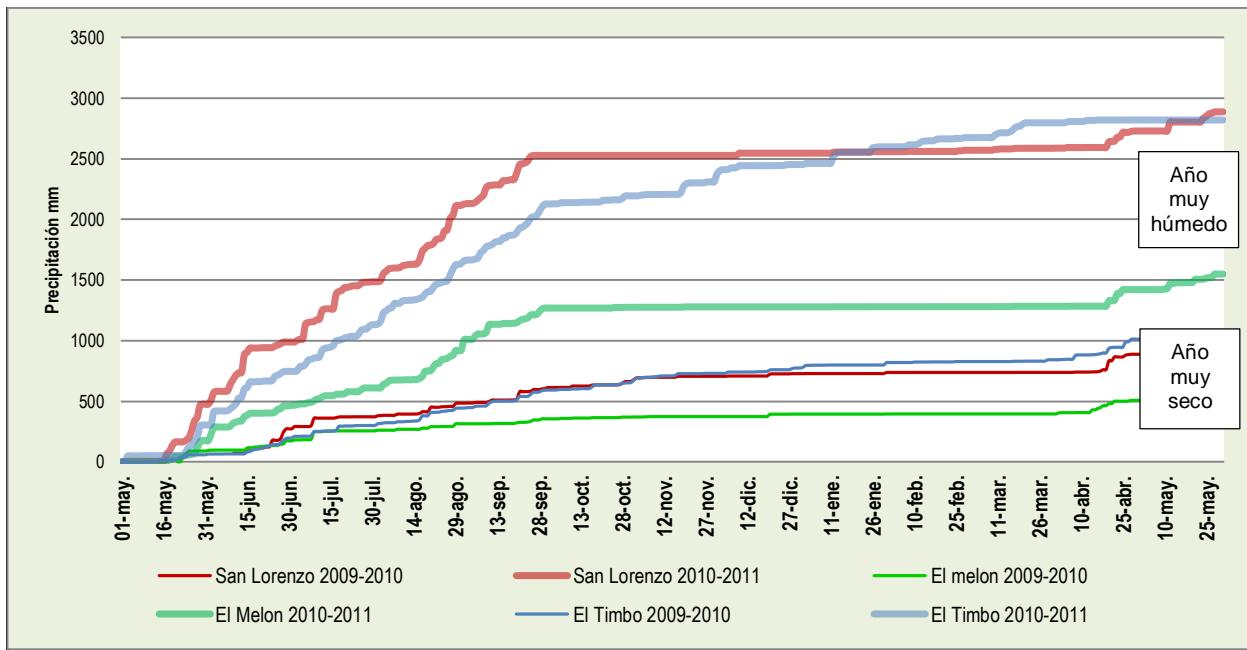


Figura 30. Precipitación acumulada en las estaciones El Timbo (bosque nuboso), San Lorenzo (bosque de pino-encino) y El Melón (bosque seco). Análisis comparativo de los años hidrológicos 2009-2010 (muy seco) y 2010-2011 (muy húmedo).

Los datos de precipitación total anual para el año muy húmedo son muy similares entre estaciones de bosque pino-encino y la estación climática ubicada en el bosque nuboso, sin embargo la duración de las lluvias en este último es de diez meses y muestra intensidades de lluvia mucho menores. Asimismo se observaron precipitaciones, durante los meses de noviembre a marzo, cercanas a los 500 mm en año muy húmedo y cerca de 300 mm en año muy seco. Es evidente, entonces, el papel crítico del ecosistema de bosque nuboso para la captación de recursos hídricos que muy probablemente se descarguen durante los meses de marzo, abril y mayo y en la época lluviosa.

b) Caudal

La Figura 21 muestra nuevamente las grandes diferencias entre el año hidrológico seco (2009-2010) y el húmedo (2010-2011). El análisis del año húmedo indica que el tiempo de respuesta hídrica del río Tecolután es muy alto, es decir, un día después de la acumulación de lluvias mayores a 100 mm, su caudal se elevó de 2 m³/s a valores cercanos a 10 m³/s.

Cerca de 30 días después de las últimas precipitaciones el caudal descendió de más de 20 m³/s a menos de 5 m³/s. Además, se evidencia una fuerte correlación entre la parte media de la subcuenca y su respuesta hídrica, especialmente al inicio de la estación lluviosa (mayo y junio) y al final de las lluvias (finales de septiembre). Las crecidas leves de la estación seca obedecen directamente a eventos de precipitación en la parte alta, donde se observan más de diez meses de lluvia. Sin embargo, estas crecidas no sobrepasan los 10 m³/s de caudal promedio diario. Esta relación sugiere vinculación entre el flujo básico y el bosque nuboso.

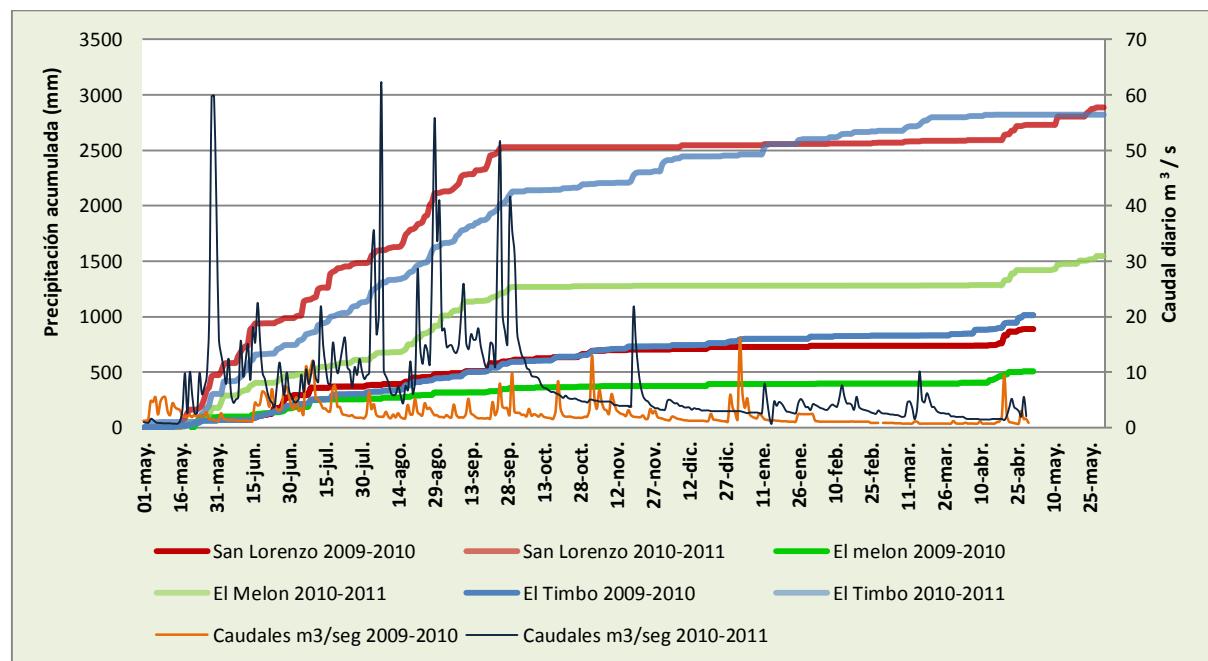


Figura 31. Precipitación acumulada de las estaciones El Timbo (bosque nuboso), San Lorenzo (bosque pino-encino) y El Melón (bosque seco) y su relación con los caudales promedio diarios de los años hidrológico 2009-2010 y 2010-2011

Respecto al caudal anual se mantienen las relaciones entre año seco y año húmedo. Para el año 2009-2010 se observa una escorrentía anual de 76 millones de m³/año (4,100 m³/ha/año, o 410 mm) y para el año 2010-2011 es de 250 millones de m³/año (13,456 m³/ha/año, o 1,348 mm).

c) **Sedimentación y erosión hídrica laminar**

Los resultados anteriores tienen implicaciones directas en la subcuenca Teculután. Aunque en el año hidrológico 2009-2010 no se presentó ningún evento de erosión significativa, para el periodo 2010-2011 si fue evidente el proceso de erosión. .

En la Figura 22 se evidencian los resultados provenientes del muestreo que se realizó para conocer la concentración de sedimentos, el cual se llevó a cabo durante la estación lluviosa –periodo con caudales altos en la subcuenca Teculután–. Es importante notar que la mayor relación entre los caudales y la erosión se presentó desde el 8 de agosto a finales de septiembre. Esto debido a que durante las primeras lluvias de mayo (específicamente el 29 de mayo), y dadas las altas precipitaciones y caudales, se formó un sitio de concentración y captura de sedimentos, denominado localmente como “la presa de piedra de zapato”. Este punto de concentración de sedimentos aguas arriba del punto de aforo de Las Minas permaneció hasta que otros eventos de precipitación intensa liberaron el obstáculo de piedras y sedimentos, el 4 de agosto de ese año (2010).

Tal como se aprecia en la Figura 22, el aumento de precipitaciones y caudal explica los valores relativamente altos de concentración de sedimentos muestreados en esa fecha. Por tal motivo, se definió que para el establecimiento de la relación matemática detallada a continuación, fueran seleccionados los eventos de aumento de caudal y muestreo de concentración de sedimentos registrados entre el 4 de agosto y el 30 de septiembre.

En la Figura 23 se muestra el modelo que relaciona la sedimentación con el caudal en la subcuenca Teculután.

La función matemática resultante es:

$$y = 0.000049x^2 + 0.001861x - 0.015500,$$

Donde:

y = sedimentación en Kg/m³

x = caudal en m³/s

Esta muestra una correlación de 0.94, que se considera adecuada para explicar y cuantificar la sedimentación en la subcuenca.

De acuerdo a la modelación a partir de caudales de 25 m³/s se muestran valores de aproximados de 0.075 de sedimentación, a la cual para fines de esta investigación se les denomina erosiones significativas. Esto confirma la escasa sedimentación observada en el año hidrológico seco, ya que los caudales no sobrepasaron este nivel (Figura 22).

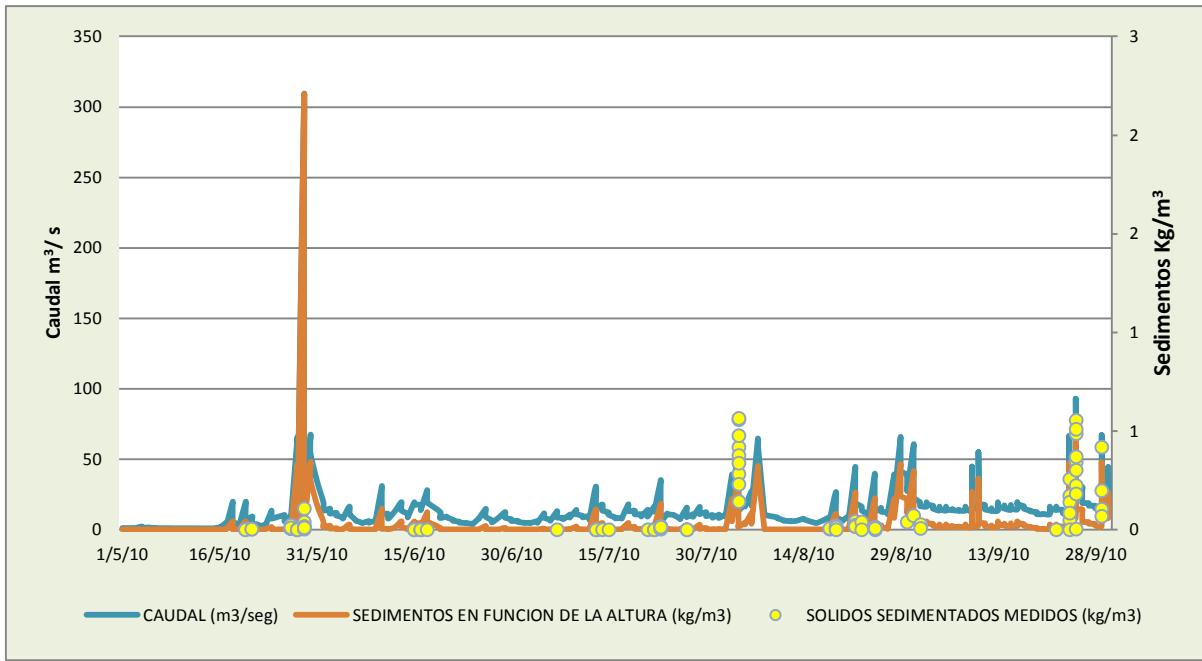


Figura 32. Puntos de muestreo de concentración de sedimentos y caudales promedio diarios en la estación de aforo Las Minas, subcuenca Teculután.

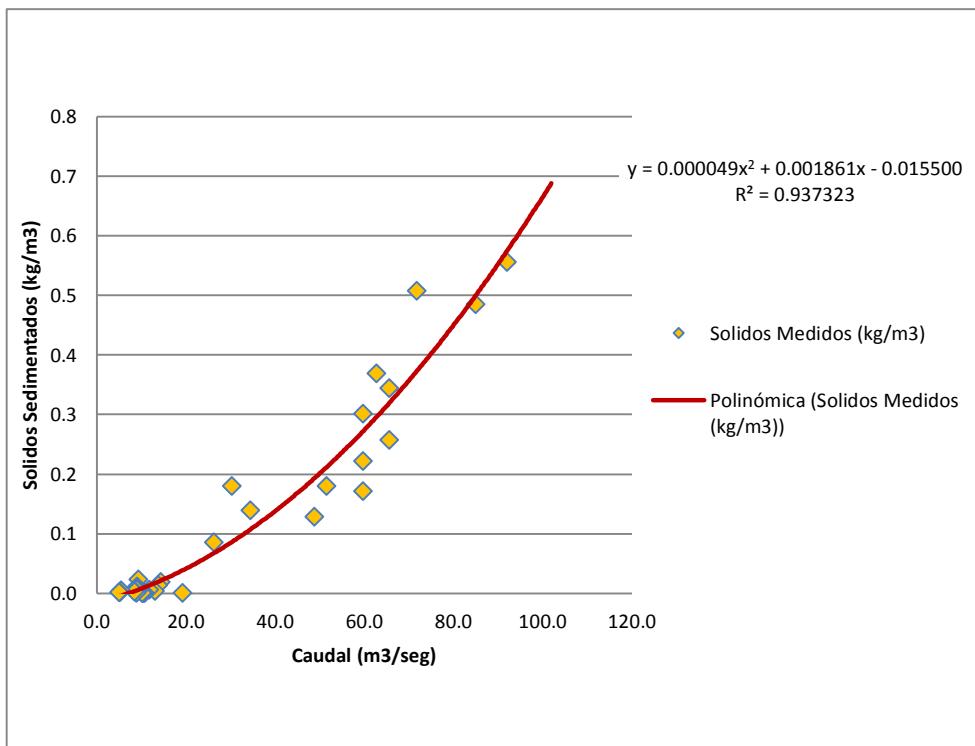


Figura 33. Modelo de la concentración de sedimentos en función del caudal de la subcuenca Teculután

Utilizando ésta función matemática, se determinó la sedimentación (es decir sedimentos en la estación de aforo) de acuerdo al conocimiento de los caudales diarios del río Tecolután. Se estimó que la sedimentación en la estación lluviosa fue de 29.64 millones de kg de suelo, para un caudal acumulado de 193.5 millones de m³.

Con base en el modelo realizado, se observa que la mayor parte de la sedimentación se obtiene a través de pocos eventos (Figura 24). Para el evento de precipitación extrema denominado Agatha (29 de mayo de 2010, inicio de la estación lluviosa) se presentó el 65% de la erosión, es decir 19.5 millones de kg suelo en un periodo de menos de tres días.

El otro periodo de alta erosión ocurrió justo al final de la “estación lluviosa”, es decir del 25 al 29 de septiembre, con 3.34 millones de kg, lo cual significa el 11% de la sedimentación total de la estación lluviosa. El 75% de la erosión sucede en el 3.8% del tiempo de la estación lluviosa (siete días) y en alrededor del 2% del año hidrológico (365 días).

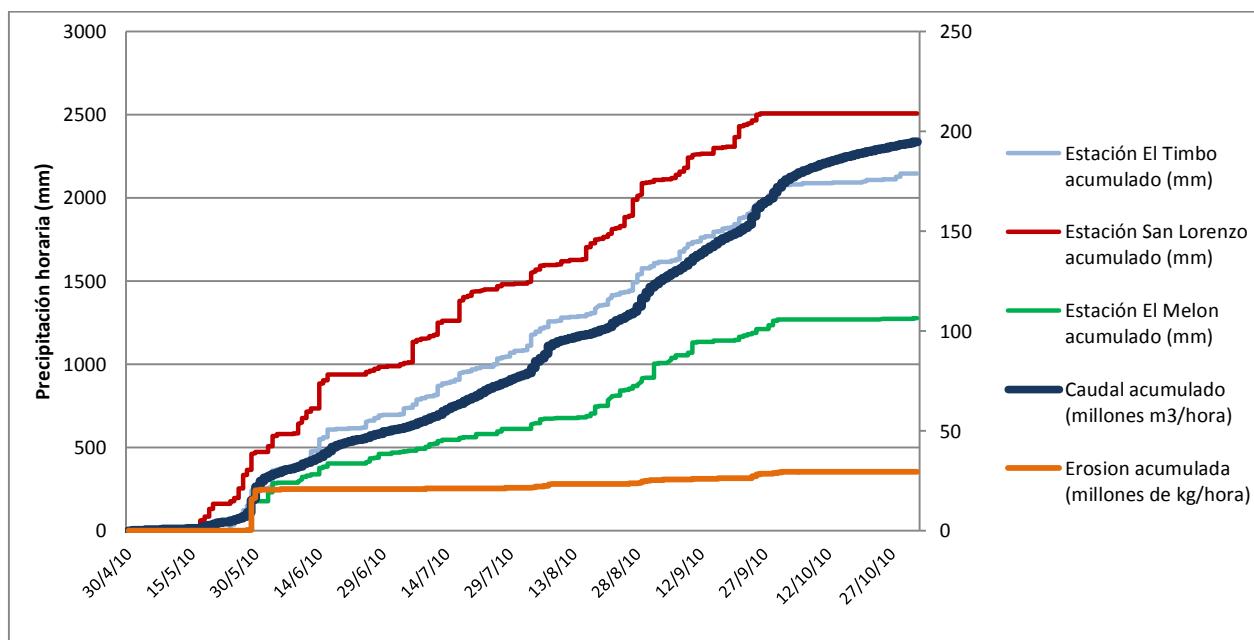


Figura 34. Precipitación, caudales y erosión modelada para el año hidrológico muy húmedo 2010-2011.

Respecto a la Importancia de la pérdida de la cobertura de bosque natural en el incremento de la erosión en la subcuenca Tecolután, WWF (WWF, 2007) reporta que por cada hectárea de bosque que se pierde, la escorrentía y la erosión se incrementan en 16,639.2 m³/año y 21.9 Toneladas métricas M/año

De acuerdo a un ejercicio de modelaciones con el programa de Soil and Water Assessment Tool (SWAT) aplicado por Rosito y Cobos (Rosito & Cobos, 2011) con datos del año hidrológico 2010-2011, se determinó que con la deforestación de 2,200 ha del ecosistema de pino encino la escorrentía instantánea pasaría de un promedio histórico de 85 mm (15.7 millones de m³/año) a 154 mm (28.3 millones de m³/año). En otras palabras, el caudal de crecidas pasaría de 6% al 11% del caudal total anual.

Estas proporciones marcaron un aumento en los niveles de sedimentación, los cuales pasaron de aproximadamente 1.6 Ton/ha/año sin deforestación a 4.5 Ton/ha/año (con la deforestación de solamente 2200 ha). Esto es equivalente en términos de erosión hídrica laminar a un cambio de 16 Ton/ha/año a 44.8 Ton/ha/año. Es decir que la deforestación de una hectárea genera 28 Toneladas métricas de erosión. Dichos resultados se pueden considerar como coherentes si se considera que éste último ejercicio fue realizado con datos de un año hidrológico muy húmedo y WWF fueron desarrollados para un año promedio.

Al comparar los resultados obtenidos de erosión para la presente tesis tenemos que mediante método USLE se estimaron 5.37 Ton/ha/año en promedio para Teculután. Rosito y Cobos, 2011 estimaron para un año muy lluvioso un promedio de 16 Ton/ha/año. Esto también puede considerarse coherente si se toman en cuenta los mismos criterios de años promedio y años climáticamente extremos. Se recalca que para el año extremo seco no se evidenció sedimentación en el río Teculután.

11.3 Definición y evaluación de servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en la subcuenca Teculután

El presente acápite se desarrolla siguiendo preguntas orientadoras para la fundamentación de la gestión de servicios ecosistémicos.

¿Por qué los métodos actuales de gestión de recursos hídricos no proporcionan resultados satisfactorios?

En Guatemala los principales conflictos en uso del agua, se favorecen por la dispersión, falta de coordinación, vacíos legales y débil gobernanza y planificación de los organismos de Estado respecto a la gestión integral del agua. Esto genera conflictos por la competencia entre los distintos usos, emisión de aguas residuales sin tratamiento por industrias y municipalidades, así como sobreuso y consecuente erosión de los suelos en la mayor parte de cuencas. Se han evidenciado reiteradamente altas tasas de degradación y agotamiento de los recursos hídricos en todas las regiones del país (IARNA-URL, 2005).

Además es evidente que no existe claridad sobre las propiedades, funciones y límites de los sistemas hídricos, especialmente a escala regional y local, consecuentemente la planificación institucional central, regional y local se hace inviable.

Como una alternativa prometedora existen experiencias incipientes de gestión de servicios ambientales a nivel local. Para el desarrollo de estas iniciativas es necesario fortalecer la institucionalidad, enfrentar la débil cultura de internalización de los costos propios de conservar la provisión de los servicios hídricos y de promover la integración de actores, los cuales en muchos casos perciben la necesidad pero carecen de los instrumentos e iniciativas adecuadas.

¿Qué se necesita para que el concepto de los servicios ecosistémicos hídricos sea operativo y efectivo para la gestión de los recursos hídricos?.

Uno de los mayores retos para hacer operativo el concepto de servicios ecosistémicos es la de comprender y hacer visibles las funciones específicas que los ecosistemas

tienen en la regulación del ciclo hidrológico (Groot, Wilson, & Boumans, 2002). Solamente a partir de este conocimiento se logrará valorar y vincular estos servicios a demandantes específicos, de acuerdo a su provisión, de tal manera que dicho servicio pueda ser “transable”. Esta información ecohidrológica, además, permitirá la generación de instrumentos normativos, técnicos y financieros con mayor propiedad y aceptación. Entre las principales necesidades de información se encuentran los siguientes aspectos:

- 1) Cuantificación biofísica de la provisión de servicios ecosistémicos hidrológicos mediante la vinculación de los procesos ecológicos y la satisfacción de necesidades por parte del sistema social. Esto implica conocer propiedades y funciones hidrológicas específicas de los diferentes ecosistemas. Por ejemplo cuánta agua recargan o cuánta erosión y escorrentía superficial retienen, y en qué época del año estos servicios son más importantes.
- 2) Especificar las contribuciones y beneficios de los ecosistemas a la sociedad, incluyendo los beneficios del subsistema económico, es decir especificar los servicios proveídos por un sistema ecológico delimitado (tal como los ecosistemas o subcuencas). En tal sentido se puede realizar una contabilidad (cuentas ambientales, inventarios, flujos y estado) de los bienes y servicios del ecosistema. Es importante indentificar los beneficiarios directos de cada servicio definido.
- 3) Definir indicadores para medir la capacidad de los ecosistemas o cuencas de proporcionar servicios y su interrelación con la sociedad.

11.3.1 Fundamentos para la definición de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en la subcuenca.

Para definir los servicios ecosistémicos en la subcuenca Tecolután se hace necesario partir de la definición de servicios ecosistémicos. Estos se han conceptualizado como un proceso o bien natural que contribuye al bienestar del ser humano. El beneficio o servicio se traduce en la provisión de bienestar socio-cultural o ganancia económica proporcionada por los servicios de los ecosistemas, como la salud, el empleo e ingresos, y abastecimiento de bienes naturales (Oudenhoven et al, 2012).

Basados en lo anterior y en la información ecohidrológica de años extremos se ha definido que en la subcuenca Tecolután los principales servicios ecosistémicos de regulación hidrológica son aquellos de provisión, especialmente los siguientes: a) provisión de agua para consumo humano y la realización de actividades socioeconómicas de manera sostenible en cantidades, y calidad adecuadas, con énfasis en la época de estiaje (febrero, marzo y abril); y, b) la provisión de regulación (disminución) de la escorrentía superficial espontánea y erosión durante eventos extremos de precipitación.

Debe ser considerado que los extremos hidrológicos, tanto las épocas de escasez de agua, como de crecidas del río causan daños severos a los subsistemas económico y social. En tal sentido son los más susceptibles de ser valorados por los sectores social, económico e institucional. Además se tiene la percepción que los impactos negativos crecientes derivados de la disminución de la capacidad del sistema subcuenca de amortiguar los caudales extremos que son cada vez más frecuentes, con mayor intensidad y que generalmente están asociados tanto al mal manejo de la cobertura del suelo como a la variabilidad climática creciente.

Derivado de todo lo anterior se definió que el servicio ecosistémico de regulación hidrológica que brindan los ecosistemas en su estado natural (con cobertura forestal o arbustiva) es la capacidad de mantener equilibrado el flujo hídrico en el punto de aforo ubicado en el poblado de Teculután (parte baja de la subcuenca). A continuación se describen.

11.3.2 Determinación biofísica de la provisión de servicios ecosistémicos hidrológicos.

Para la cuantificación biofísica de los servicios ecosistémicos se parte, precisamente, de la descripción biofísica de los principales ecosistemas que tienen funciones hidrológicas particulares (Cuadro 2), los cuales son: Bosque nuboso (UMCF) y Bosque de pino encino (LMCF y LMHF), para mayor información de los mismos consultar Capítulo II de esta tesis.

Cuadro 10. Descripción biofísica general de los ecosistemas con propiedades en la regulación hidrológica de la subcuenca Teculután

Ecosistema	Ubicación y fisiografía	Hidro-Geología	Suelos representativos	Vegetación natural	Unidad cartográfica representativa
Bosque Nuboso (UMCF)	Parte alta de cuenca. Entre altitudes mayores a 2100	Pzm, rocas metamórficas, impermeables, no conforman acuíferos de importancia	Inceptisoles, profundos 1 m o más	Bosque latifoliado. Cuatro estratos principales	Unidad de Mapeo 3, ver Figura 25
Bosque de Pino-encino (LMCF y LMHF)	Parte media de la cuenca. Entre 800 y 2200 msnm.	Pzm, rocas metamórficas, impermeables, no conforman acuíferos de importancia	Entisoles e inceptisoles, poco profundos (0.3 m), poco desarrollados, textura arenosa y franca	Bosque de coníferas y de coníferas y encino (mixto). Dos estratos principales	Unidad de Mapeo 11, ver Figura 25

A continuación se presentan las características hidrológicas básicas de los ecosistemas bajo análisis. En la Figura 26 se puede observar las principales variables del balance hídrico de las unidades de mapeo representativas. En ella destaca que la lámina de recarga anual de Bosque nuboso es superior a un lámina de 1200 mm, mientras que la de Bosque de Pino encino es inferior a 500 mm.

Estas grandes diferencias se explican ya que el ecosistema de Pino encino presenta relativamente elevadas pérdidas, tanto en escorrentía (el único que presenta esta atributo), la cual es de 32 % respecto de la lluvia, así como de ETR. Otro aspecto importante es que, por sus características biofísicas, la lluvia es significativamente mayor en el Bosque de nuboso y el porcentaje de lluvia que recarga, la cual es cercana al 60% (Figura 26 y 27).

Las láminas de recarga y escorrentía anuales estimadas para un año promedio son de 432 mm (recarga) y 495 mm (escorrentía) para Bosque de pino encino. Asimismo la lámina de recarga para Bosque nuboso es de 1,272 mm y no presenta escorrentía

(Figura 26). Esto sucedió en una superficie de aproximada de bosque nuboso y 13,800 ha de bosque de pino encino y de 3,000 ha (ambas suman 16,800 ha). Suponiendo que estas láminas de recarga y escorrentía se convierten en caudal superficial sería equivalente a un caudal promedio de salida de 5.2 m³/s al año. Dicho dato coincide con el caudal promedio anual de 4.9 m³/s promedio histórico (Figura 17). Lo anterior muestra altas similitudes entre la modelación de la recarga hídrica empleado y la medición de caudales de salida en la subcuenca Teculután. Al mismo tiempo parece confirmar que la subcuenca Teculután es un sistema casi impermeable y confirma la idoneidad de escogencia de estas unidades de mapeo (UM) como representativas de la subcuenca.

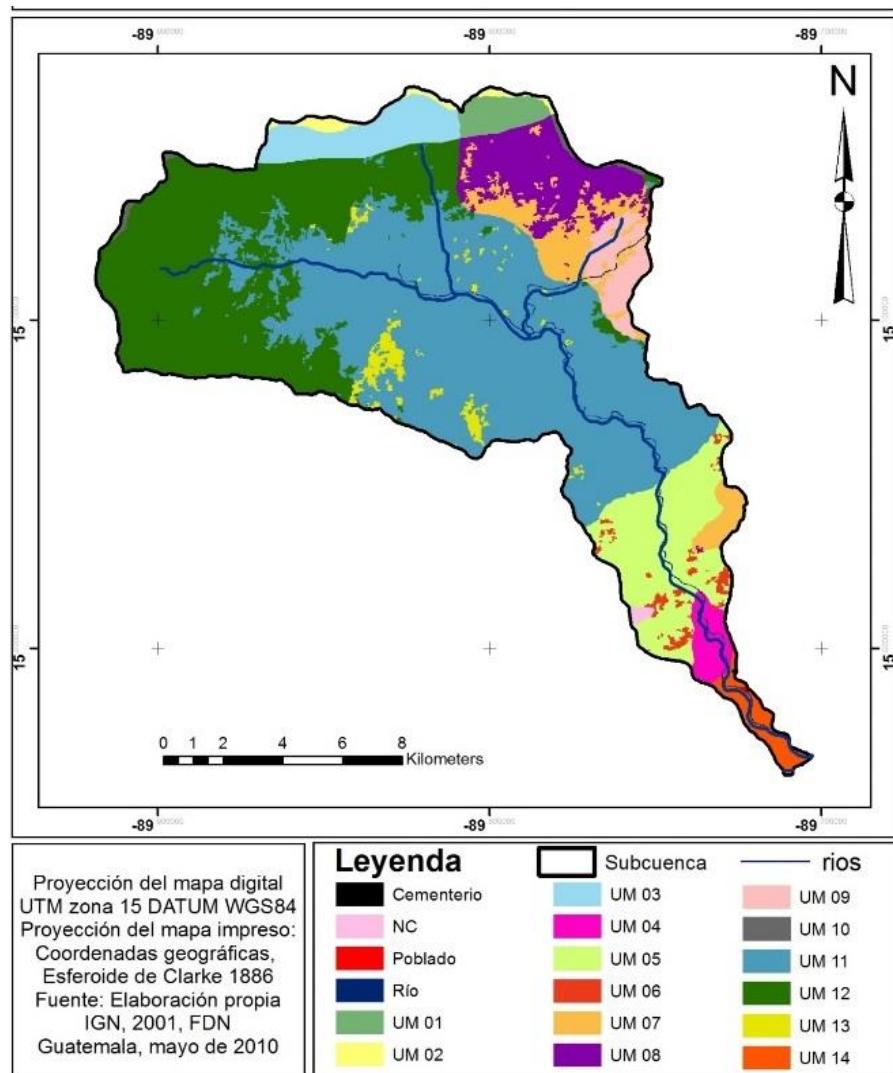


Figura 35. Unidades de mapeo de la subcuenca Teculután. Unidad de mapeo 3: representativa del ecosistema Bosque nuboso. Unidad de mapeo 11: representativa del ecosistema de Pino encino.

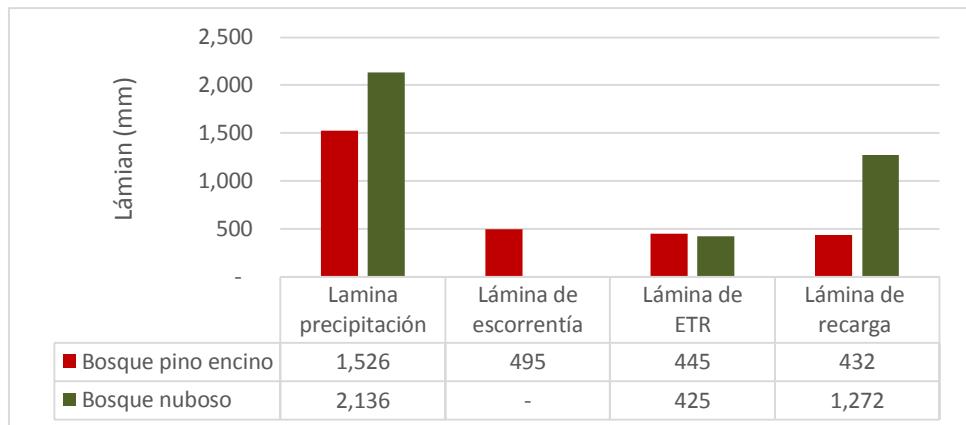


Figura 36. Características hidrológicas y climáticas generales de los ecosistemas Bosque nuboso y Bosque pino encino, en un promedio histórico.

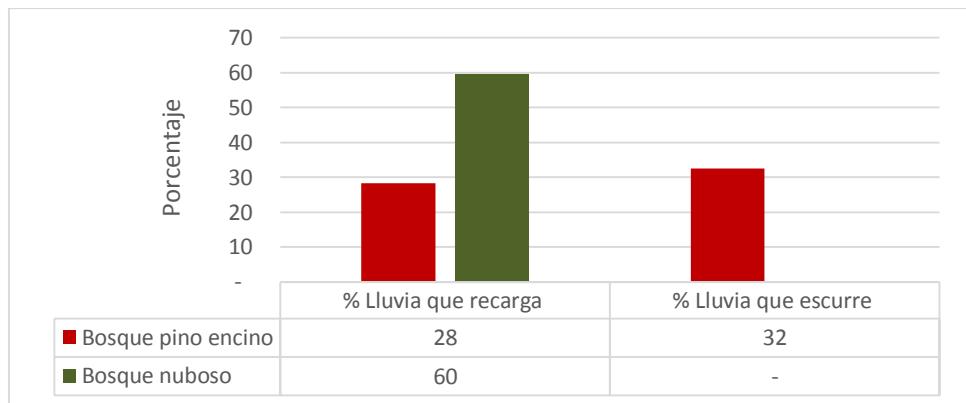


Figura 37. Porcentaje de lluvia que recarga y que escurre en los ecosistemas Bosque nuboso y Bosque pino encino, en un año seco

Para profundizar en el análisis de la generación de servicios ecosistémicos de regulación hidrológica se procedió analizar sus propiedades y funciones ecohidrológicas en años climáticos extremos.

Análisis de caudales mínimos en un año muy seco.

A continuación se analiza el año definido como muy seco de 2009 -2010. En la Figura 28 se aprecia que el Bosque nuboso presenta precipitaciones cercanas o superiores a 50 mm durante once meses al año. Esto es destacable porque dichas láminas son superiores a las demandas evapotranspirativas de la atmósfera (ETP). Derivado de lo anterior el bosque nuboso presenta siete meses con láminas de recarga hídrica y contrasta con el ecosistema de Pino encino que únicamente presenta cuatro meses con recarga (Figura 29), lo cual sucede únicamente en la primera parte de la estación lluviosa, presentando una recarga total anual muy inferior (150 mm). Otro aspecto relevante es que para este año únicamente el Bosque nuboso presenta recarga durante los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero (Figura 29). Lo anterior vinculado a la no existencia de acuíferos importantes en la subcuenca nos indica la importancia y relación directa de la recarga en ésta época con el mantenimiento de los caudales de estiaje (flujo básico) especialmente en marzo y abril. Esta relación podrá ser comprobada en el futuro con métodos hidroquímicos. Sin embargo se pueden establecer

como datos de referencia que apoyan consistentemente la presunción de una estrecha vinculación entre la recarga en el bosque nuboso y los caudales mínimos en la parte baja de la subcuenca.

Se realizó un balance hídrico de suelos (con el método Schosinsky y detallado en Capítulo III.I de esta tesis) en las unidades de mapeo (UM) representativas de los ecosistemas de Bosque nuboso y Pino encino, se sumaron las láminas de recarga de octubre a enero en el ecosistema de bosque nuboso para el año 2009, las cuales totalizan 65 mm (Figura 29). Asumiendo que el área de este ecosistema es cercana a 3,000 ha se obtuvo un caudal de salida promedio de 0.75 m³/s durante un mes. Este es un valor cercano al caudal diario promedio mensual medido en la estación de aforo para el mes de marzo de 2010, el cual es 0.88 m³/s (Figuras 12 y 18).

Aunque la lámina de 65 mm de recarga hídrica en el ecosistema de Bosque nuboso sucede durante la época en la que no se observó recarga en el ecosistema de Bosque pino encino y previo a la época de estiaje en la parte baja de la cuenca no puede establecerse un vínculo directo con los caudales de marzo en el punto de aforo. Sin embargo si es posible establecer la altísima importancia de dicha recarga hídrica y ofrece aún mayor consistencia al planteamiento de que la recarga del Bosque nuboso se vincula con el mantenimiento de los caudales mínimos, especialmente durante años secos.

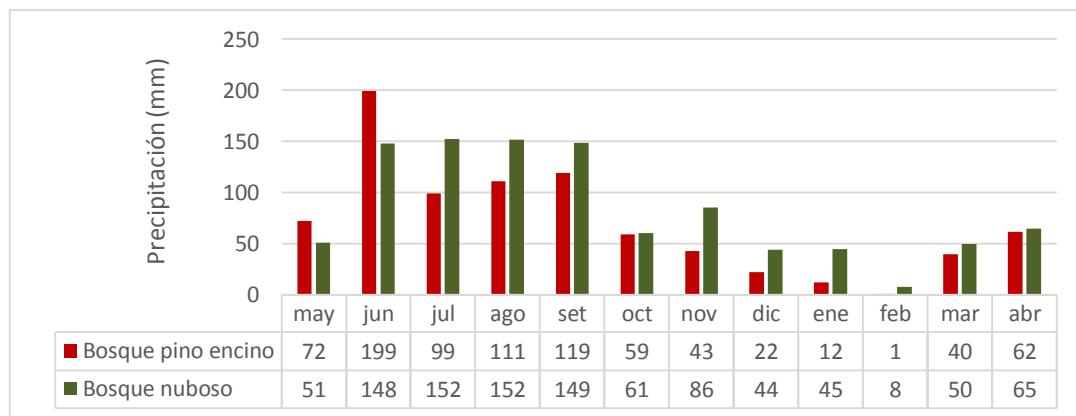


Figura 38. Precipitación mensual de los ecosistemas durante un año muy seco.

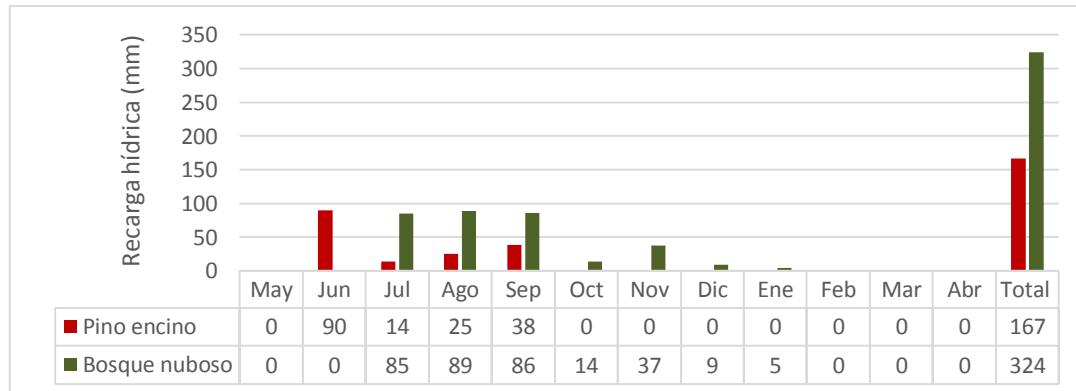


Figura 39. Recarga hídrica mensual de los ecosistemas durante un año muy seco, aplicando balance hídrico de suelos propuesto por Shcosinsky.

Análisis de caudales máximos y erosión en un año muy húmedo

La ecohidrología en un año muy húmedo, tal como el 2010-2011, demuestra el papel crítico del ecosistema Pino encino en la regulación hidrológica del flujo instantáneo (escorrentía superficial espontáneo), y consecuentemente, en los procesos de erosión los cuales están íntimamente vinculados. Es oportuno recalcar que para que haya erosión hídrica es imprescindible que exista saturación hídrica en los suelos o que las velocidades de infiltración básica sean excedidas.

En el Cuadro 3 se muestran las intensidades de lluvia de cuatro de los mayores eventos de precipitación durante el año 2010. Se logra evidenciar que las intensidades de lluvia diarias y horarias para el ecosistemas de Pino encino no solamente son mucho mayores a las de Bosque nuboso sino, lo más importante, es que exceden las tasas de infiltración básica de los suelos (20 mm/hora). Especialmente en los eventos 2 y 3, del 12 de junio y 6 de julio, respectivamente; la intensidad horaria triplica y casi cuadriplica la conductividad hidráulica de los suelos (capacidad de los suelos para absorber agua). Evidentemente esto puede generar procesos de erosión severa. Este patrón no se observa en el Bosque nuboso con láminas generalmente muy por debajo de las velocidades de infiltración de los suelos.

Cuadro 11. Infiltración básica e intensidades de lluvia diaria (mm/día) y horarias (mm/hora) ocurridas en cuatro eventos extremos en los ecosistemas estudiados durante el año 2010.

Ecosistemas	Infiltración básica representativa (mm/hora)	Evento 1 29 de mayo		Evento 2 12 de junio		Evento 3 6 de julio		Evento 4 3 de agosto	
		Diaria	Horaria	Diaria	Horaria	Diaria	Horaria	Diaria	Horaria
Bosque pino encino	20	99.4	20.40	148.2	74.4	124.4	57.8	58.6	17
Bosque nuboso	19	93.2	15.2	70.4	32	19.2	5.2	69.2	17.2

a) **Bosque nuboso y la provisión de los servicios ecosistémicos de estabilización de caudales mínimos y recarga hídrica.**

El ecosistema Bosque nuboso, en condiciones naturales de cobertura, provee el servicio ecosistémico de estabilización de caudales mínimos y recarga hídrica. Esto se justifica en que normalmente, de acuerdo al balance hídrico de suelos, presenta una recarga hídrica anual superior 1200 mm, las mayores precipitaciones (mayores a 2000 mm), la lámina de porcentaje de lluvia que recarga es cercana al 60% y un factor de 2.3 de porcentaje de superficie respecto del porcentaje de recarga hídrica en la subcuenca. Como este ecosistema abarca el 15% de la superficie de la subcuenca podemos estimar que aporta aproximadamente el 35% de la recarga hídrica total.

Durante años muy secos se comprobó que durante once meses se presentaron láminas de lluvia superiores a la ETP y mantiene láminas de recarga hídrica durante los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero, lo cual se considera crítico para el abastecimiento de los caudales de estiaje o caudales mínimos (recalcando que ésta evidencia física preliminar puede ser validada hidroquímicamente en un futuro).

Se evidenció que en años muy húmedos, durante los eventos extremos de precipitación asociados, las intensidades de lluvia generalmente no exceden la infiltración básica (lo cual favorece la recarga hídrica), y, en los pocos eventos que se excede esta tasa se puede considerar como moderadamente superior.

Se considera que la cobertura arbórea es crítica para mantener las mencionadas relaciones ecohidrológicas, las cuales cambiarían drásticamente con el sobre uso de los suelos, desde desbalances energéticos que pueden influir en mayores intensidades de lluvia horarias o cambio en el patrón de precipitaciones, hasta la pérdida de la capacidad de protección de los suelos (ya evidenciado en al Capítulo III.II)

b) Bosque de pino encino y la provisión del servicio ecosistémico de estabilización de caudales máximos instantáneos (crecidas) y erosión.

Considerar la estrecha vinculación que existe entre los fenómenos de erosión y escorrentía superficial es básica para evidenciar el papel de los ecosistemas en la regulación de estos procesos. El ecosistema de pino encino, en buen estado de conservación, está relacionado directamente con el servicio de estabilización de crecidas y erosión hídrica por los siguientes motivos. Las condiciones biofísicas en donde está ubicado son propicias para la erosión por presentar altas pendientes (50% o más) y suelos poco desarrollados (sin perfiles) y arenosos (los factores que generan la erosión ya fueron abordados y para mayor información consultar los Capítulo II y Capítulo III.II).

De acuerdo al balance hídrico de suelos en este ecosistema se presentan láminas anuales de escorrentía superficial (instantánea) superior el 30% de la lluvia. Otro aspecto crítico es la erosividad de la lluvia. Durante eventos extremos de precipitación se evidenciaron intensidades de lluvia que hasta casi cuadriplican la capacidad de los suelos de absorber agua (conductividad hidráulica) (Cuadro 3).

De acuerdo a la modelación de erosión de suelos por el método USLE, la región que este ecosistema abarca presenta un promedio entre 5 y 15 Ton/ha/año y en algunos sitios deforestados aumenta significativamente llegando hasta 150 Ton/ha/año o más (ver Capítulo III.II de esta tesis). De acuerdo a fuentes bibliográficas una hectárea deforestada aumenta en promedio alrededor de 20 toneladas de suelo al año (WWF, 2007).

11.3.3 Información ecohidrológica de años extremos y su aplicación a esquemas de pago por servicios ecosistémicos hidrológica y su valoración en la subcuenca.

El presente acápite es complementario a la investigación ecohidrológica y no se constituye una responsabilidad del autor. Más bien es la recopilación de fuentes secundarias (WWF, 2009; WWF, 2007; WWF, 2012) sobre la aplicación de la información ecohidrológica de línea base generada y anteriormente descrita. Se desarrolla bajo algunas premisas que se consideran importantes para la implementación de esquemas de pago por servicios ecosistémicos. De acuerdo a FAO (FAO, 2015), es necesario establecer claramente la identificación y la cuantificación de la demanda. Los usuarios, los proveedores y el servicio deben estar muy claramente definidos. Es

necesario basarse en un modelo causal (verificado) entre uso del suelo (para este caso la restauración y conservación de la vegetación natural) y el servicio.

Se establece que los oferentes principales de los servicios de los ecosistemas son los mayores propietarios y administradores del área protegida RBSM. Entre los grandes propietarios de los terrenos de la parte media y alta de la subcuenca se encuentran, la municipalidad de Teculután con un área de reserva de 2,200 ha. Terrenos del Estado a cargo del administrador de la RBSM, Fundación Defensores de la Naturaleza, que sin tener certeza se estima que son aproximadamente 9,000 ha. Finca de la empresa forestal Maderas El Alto, área indeterminada pero se estiman 5,000 ha. Una comunidad, la cual no reside en la cuenca y tienen como reserva forestal los terrenos, con un área aproximada de 2,000 ha. El resto, aproximadamente 4,000 ha son terrenos, muchas veces si legalizar, de pobladores que no residen en la parte media o alta de la cuenca sino en el poblado de Teculután que en escaso número se dedican a la agricultura, excepto en el sitio conocido como las Vegas en la parte media de la cuenca a una altitud aproximada de 900 msnm. Este grupo debe ser incorporado a mejores prácticas de agricultura por medio de asistencia técnica y proyectos de desarrollo de parte de las instituciones locales, especialmente FDN y la municipalidad.

Los principales demandantes se los servicios de estabilización de caudales mínimos y recarga hídrica se describen a continuación.

Usuarios de sistemas de riego artesanal. Este se constituye en el principal grupo de usuarios de agua, especialmente en época seca. Se estima que el uso asciende al 46% del caudal superficial, la cual equivale a 154 millones de m^3 (4.9 m^3/s). La demanda del sistema de riego es de 2 m^3/s . Se ha estimado que el riego genera un ingreso bruto de Q 98 millones (WWF, 2009).

La población consume cerca de 1.3% del caudal superficial, lo cual equivale 0.06 m^3/s para abastecimiento de hogares (WWF, 2007). En representación de estos demandantes actúa la municipalidad.

Los principales demandantes se los servicios de estabilización de caudales máximos y erosión se describen a continuación. En eventos erosivos de precipitación extrema que conducen a la destrucción de infraestructura civil y de abastecimiento de agua es la sociedad en su conjunto la demandante. La municipalidad se constituye en el demandante principal por el manejo de agua con altos contenidos de sedimentos especialmente vinculada al tratamiento de agua para

Mediante la implementación de una valoración contingente se determinó la disposición de los pobladores de Teculután a pagar, DAP, para absorber los costos de conservar y restaurar la subcuenca, el 70% de los entrevistados respondió afirmativamente (WWF, 2007).

Basándose en la información ecohidrológica descrita anteriormente, la misma fue presentada y validada por representantes de la Dirección Municipal de Planificación y de la Corporación Municipal de Teculután por los administradores del Área Protegida. Se consensuó que la regulación de los flujos de agua durante la estación seca y la reducción de sedimentos en la época lluviosa influye directamente en la disponibilidad de agua potable y que los servicios ambientales deberían evaluarse en estación seca (caudales mínimos) y estación lluviosa (caudales elevados), reconociendo un rol diferenciado de los ecosistemas y época de provisión. Es importante mencionar que la

municipalidad cuenta con sistemas de captación de agua superficial, tratamiento de agua y un sistema de distribución. Cuando se enfrentan problemas de abastecimiento del caudal del río se utiliza un sistema alternativo de bombeo de aguas subterráneas, el cual se considera insuficiente y con altos costos de funcionamiento.

En términos generales, basados en información ecohidrológica, se proponen como caudales diarios mínimos “deseables” 0.8 m³/s (caudal mínimo registrado en año seco) por la municipalidad y pobladores. Se consideró por parte de los pobladores que la conservación y restauración de la cobertura natural de los ecosistemas (bosque nuboso) puede conducir a contar con estos caudales durante al menos 60 días durante los meses de marzo abril y mayo (época seca) para lograr un adecuado abastecimiento de agua. Derivado de eso los beneficios económicos de este servicio ambiental se relacionan con:

- Reducción de costos de bombeo.
- Reducción de los costos por consumo de agua embotellada por parte de los pobladores.

En relación a la estación lluviosa el servicio ambiental es la estabilización de caudales máximos instantáneos, que se refiere a los eventos en que los caudales instantáneos son superiores a 20 m³ /s, por ser los causantes de erosión hídrica laminar significativa (> 0.05 kg/m³). En este caso se consideró por parte de los pobladores que la conservación de los ecosistemas (de pino y encino) logaría un abastecimiento de cerca de 90 días más de agua proveniente de fuentes superficiales, ya que es el número de días en que se deben dejar de emplear, por limpieza de sedimentos, la infraestructura de captación de agua superficial. Para este caso los beneficios económicos son:

- Reducción de costos de bombeo
- Reducción de los costos por consumo de agua embotellada
- Reducción de los costos en infraestructura que se dividen en: a) costos en reemplazo de infraestructura dañada; b) Mantenimiento de los desarenadores.

El valor económico de los servicios hidrológicos generados por el proyecto es de Q1,946,296 (US\$250,005). Al analizar estos individualmente se tiene que por estabilización de caudales mínimos (en estación seca) se genera un total de Q945,584.80 (US\$121,462) los que equivalen al 49% del valor total de los servicios ambientales; en tanto que es la estabilización de caudales máximos instantáneos (que se da en la estación lluviosa) genera Q1,000,711.62 (US\$128,543). Un dato interesante es que la reducción de costos por consumo de agua embotellada en estación seca y lluviosa corresponde a Q1,687,697 (US\$216,787) que es el 87% del valor económico estimado por los servicios de regulación hidrológica. Entre los aspectos pendientes de desarrollar destacan: a) incluir en el funcionamiento del esquema de pagos por servicios ambientales a otros actores clave, tales como productores agrícolas de exportación (organizados o no); b) incorporar multiplicidad de servicios hidrológicos ofrecidos por el ecosistema. c) continuar con el sistema de monitoreo hidroclimático y de retroalimentación de información ecohidrológica y social, así como contar con un sistema de alerta temprana de emergencias y de incendios forestales; d) considerar la factibilidad de implementación de infraestructura de regulación hidrológica y sistemas de almacenamiento de agua en la parte baja de la cuenca.

11.3.4 Determinación de indicadores para evaluar los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica de la subcuenca.

En el Cuadro 4 se presentan los indicadores para evaluar los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en la subcuenca Tecolután. En primer lugar se establece claramente dicho servicio ecosistémico y el ecosistema que lo provee. Se asume que el estado natural del ecosistema es el estado óptimo del mismo.

Se definen dos tipos de indicadores, a saber: a) de estado y b) de efectividad. Los indicadores de estado son útiles para definir las condiciones actuales, dinámica y tendencias de los ecosistemas y del servicio ecosistémico específico así como de su interacción. Para tal fin es necesario procurar un monitoreo continuo, establecer características estadísticas (medias, variabilidad, recurrencia, etc.) de ambos componentes y modelar su interacción.

Los indicadores de efectividad son útiles para medir cuantitativa y biofísicamente la efectividad de un ecosistema para brindar un servicio ecosistémico dado. Para este fin se proponen indicadores de condiciones hidrológicas extremas y los umbrales del servicio alcanzados en función del estado actual de los ecosistemas.

Para el caso de los caudales mínimos y recarga hídrica se proponen las anomalías (distancia de la media) de los caudales en los meses más secos como el método para evaluar si el ecosistema brinda adecuadamente el servicio de regulación hidrológica. Por ejemplo la anomalía para el mes de marzo en el año seco monitoreado, la cual es de -62% y la anomalía de caudal anual en este mismo año fue de -52 (Figura 19). Se supone que si estos umbrales son sobrepasados en un año seco supondría que alguno de los componentes del sistema o del servicio está cambiando, esto indicaría una alerta importante. Por ello además del umbral aislado de porcentaje de caudal anual se propone relacionarlo con la anomalía de la precipitación anual, la cual, para el año 2009 es de -40% en el bosque de pino encino. Entonces, se tiene que $-52\% / -40\% = 1.3$. Si este umbral llegara a ser mayor significaría que el ecosistema ya no ofrece el servicio ecosistémico en la misma proporción a la medida en el año 2009. Estos indicadores pueden ser perfeccionados con el apoyo de estudios hidroquímicos de agua, especialmente de isotopos estables.

Para el caso de caudales máximos instantáneos, se propone la evaluación de la erosión en función de los caudales, de acuerdo al modelo desarrollado en este capítulo de la tesis (Figura 23). Si los umbrales de erosión modelada llegaran a ser mayores (que el promedio de muestras tomadas en el punto de aforo) sugeriría que el ecosistema no cumple su función reguladora, de acuerdo a las mediciones del año muy húmedo.

Además de los indicadores también se definen sitios de muestreo, época crítica de muestreo (eventos extremos) y períodos de retorno esperados para la ocurrencia de dichos momentos críticos de muestreo.

Cuadro 12. Descripción de los servicios de regulación hidrológica definidos para la subcuenca Tecolután, indicadores y aspectos importantes para su evaluación.

Servicio ecosistémico de regulación hidrológica	Indicadores para evaluar su estado y efectividad de los ecosistemas para proveer servicio	Umbráles de incumplimiento o alarma basado en años extremos	Sitio de evaluación	Tiempos críticos de evaluación	Período de retorno más probable
Estabilización de caudales mínimos y recarga hídrica.	Estado Ecosistema % cobertura boscosa y dinámica del ecosistema de bosque nuboso. Servicio ecosistémico de regulación hidrológica Caudales. Estación de aforo Las Minas	% cobertura menor al 95% y dinámica que exceda - 0.5 / año. Caudales promedio mensuales menores a 0.88 m ³ /s (referente: caudal alcanzado marzo 2009 = 0.88 m ³ /s). Caudales promedio anual menores a 2.4 m ³ /s (referente: 2009)	Bosque nuboso (2,100 a 2,800 msnm). Estación de aforo de caudales Las Minas	Durante febrero, marzo, abril y mayo; y posterior a un año climático seco o con influencia del El Niño.	Formación del Niño: periodo de retorno promedio de entre 3 y 7 años con un promedio de 4 (IPCC, 2001)
	Efectividad del servicio Anomalías de caudales en año seco.	Anomalía en mes de menor caudal: - 62% (referente: anomalía de caudal alcanzada en marzo 2010). Anomalía de caudal en año seco: -52 % (referente: anomalía alcanzada en año 2009-2010) Relación entre % de anomalía de caudal promedio anual y % anomalía de precipitación anual mayor a 1.5 (referente: Anomalía alcanzada en 2009 - 2010).	Estación de aforo de caudales Las Minas		

Cuadro 13 (continuación) Descripción de los servicios de regulación hidrológica definidos para la subcuenca Tecolután, indicadores y aspectos importantes para su evaluación.

Servicio ecosistémico de regulación hidrológica	Indicadores para evaluar su estado y efectividad de los ecosistemas para proveer servicio	Umbrales de incumplimiento o alarma basado en años extremos	Sitio de evaluación	Tiempos críticos de evaluación	Período de retorno más probable
Estabilización de caudales máximos instantáneos y erosión	Estado Ecosistema: % cobertura boscosa y dinámica del ecosistema de bosque pino encino. Caudales en estación de aforos Las Minas.	% cobertura menor al 95 % de año referencia (2007) y dinámica que exceda - 0.5%/año Caudales diarios mayores a 20 m ³ /s durante más de 17 días al año (referente: alcanzado en 2010) Caudales mensuales mayores a 10 m ³ /s durante más de tres meses en un año (referente: alcanzado para 2010)	Bosque de pino encino, (800-2,100 msnm). Estación de aforo de caudales Las Minas	Durante los meses de mayo, junio, julio, septiembre u octubre. Se incrementan las probabilidades de incidencia de eventos extremos durante influencia de La Niña.	Indefinido, es preciso profundizar esta información.
	Efectividad del servicio Cargas de sedimentos en kg/m ³ .en caudales de estación de aforo Las Minas Anomalía de caudales	Cargas de sedimentos > 0.05 kg/m ³ .en caudales de 20 m ³ /s, Cargas de sedimentos > 0.2 kg/m ³ .en caudales de 40 m ³ /s, Cargas de sedimentos > 0.6 kg/m ³ .en caudales de 100 m ³ /s. % de anomalía de caudal mensual mayor a 269 (referente: alcanzado en mayo de 2010).	Estación de aforo de caudales Las Minas		

12Conclusiones

El monitoreo y análisis ecohidrológico en años climáticos extremos es útil para establecer relaciones entre los ecosistemas y sus funciones y los servicios de regulación hidrológica que proveen a la sociedad.

La parte alta de la cuenca, ecosistema de Bosque nuboso es crítica para la recarga hídrica y la regulación del caudal durante una estación seca, siendo esto aún más importante en años hidrológicos secos.

Se determinó que el buen estado de conservación del ecosistema de bosque de pino-encino, es crítica para la regulación de caudales máximos y erosión, especialmente durante eventos extremos de precipitación.

Los pobladores de Teculután están dispuestos a pagar y participar activamente en la conservación de los servicios ecosistémicos definidos. En tal sentido existe un antecedente de valoración económica y organización local para la gestión de estos servicios ecosistémicos.

Se logró definir satisfactoriamente indicadores para la evaluación del estado de los ecosistemas y de efectividad y rendimiento de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica que proveen.

13 Bibliografía

- Adger, N. (2003). Social Capital, Collective Action, and Adaptation to Climate Change. *Economic Geography*, 79(4), 387-404.
- Adger, N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(1), 268–281.
- Adger, N., & Vincent, K. (2005). External Geophysics, Climate and Environment. Uncertainty in adaptive capacity. *C.R. Geoscience*, 337, 399–410.
- Adger, N., Arnell, N., & Tompkins, E. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15, 77-86.
- Adger, N., Huq, S., Brown, K., Conway, D., & Hulme, M. (2003). Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in Development Studies* 3,3 (2003) pp. 179–195, 179-195.
- Adger, N., Huq, S., Brown, K., Conway, D., & Hulme, M. (2012). Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in development studies*, 47, 47-55.
- Agrawala, S. (2003). Climate Change and Development. *IDS Bulletin* 35.3, 35(3), 51-59.
- Alianza para la Conservación de los Bosques de Pino-Encino de Mesoamérica. (2008). *Plan de conservación de los bosques de pino-encino de Centroamérica y el ave migratoria dendroica chrysolophia*. (C. Pérez, E. Secaira, & S. Macías, Edits.) Guatemala: Fundación Defensores de la Naturaleza.
- Andrade, G. I., Sandino, J. C., & Aldana-Domínguez, J. (2011). *Biodiversidad y territorio innovación para la gestión adaptativa frente al cambio global. Insumos técnicos para el plan de acción nacional para la gestión integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos*. Bogotá: Instituto Humboldt, Colombia.
- Aronson, R. (2009). Overview - Climate Change and Adaptation. *Sustainability 2009: The Next Horizon*, edited by G. L. Nelson and I. Hronszyk, 1-10.
- Ayers, J., & Dodman, D. (2010). Climate change adaptation and development I: the state of the debate. *Progress in Development Studies* 1, 10(2), 161-168.
- Beg, N., Morlot, J. C., Davidson, O., Afrane-Okesse, Y., Tyani, L., Denton, F., . . . Rahman, A. A. (2002). Linkages between climate change and sustainable development. *Climate Policy*, 2, 129-144.
- Bird Species and Climate Change: The Global Status Report version 1.0. (2007). *A Climate Risk Report The Global Status Report: A synthesis of current scientific understanding of anthropogenic climate change impacts on global bird species now, and projected future effects*.
- Bowen, A., Cochrane, S., & Fankhauser, S. (2012). Climate change, adaptation and economic growth. *Climatic Change*, 113, 95–106.
- Boyd, J., & Banzhaf, S. (2007). What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 1-11.

- Braat , L., & Groot, R. (2012). The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. *Ecosystem Services*, 4-15.
- Brooks, N., Grist, N., & Brown, K. (2009). Development Futures in the Context of Climate Change: Challenging the Present and Learning from the past. *Development Policy Review*, 2009, 27(6), 741-765.
- Brown, M., & De la Roca, I. (1996). *A valuation analysis of the role of cloud forest in watershed protection*. Guatemala: RARE.
- Bruijnzeel. (1990). *Hydrology of moist tropical forest effects of conversion. A State of knowledge review*. . Amsterdam: UNESCO, International Hydrological Programme.
- Bruijnzeel, S. (1999). Hydrology of Tropical Montane Cloud Forest: a reassessment. En I. H. Programme, *Second International Colloquium on Hydrology and Water Management in the Humid Tropics* (pág. 27). Panama: UNESCO.
- Bruijnzeel, S. (2008). Demonstrating hydrological bennefits from tropical reforestation efforts. (pág. 31). Amsterdam: Vrije Universitet.
- Bruijnzeel, S., Scatena, F., & Hamilton, G. (2010). *Tropical Mountain Cloud Forest. Science for Conservation*. New York: Cambridge press.
- Burkharda, B., de Groot, R., Constanza, R., Seppelt, R., Jorensen, S., & Potschin, M. (2012). Editorial: Solutions for sustaining natural capital and ecosystem services. *Ecological Indicators*, 21, 1-6.
- Burton, I., Huq, S., Lim, B., Pilifosova, O., & Schipper, E. L. (2002). From impacts assessment to adaptation priorities:the shaping of adaptation policy. *Climate Policy*, 2, 145–159.
- CATIE. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica* . Turrialba: CATIE-ASDI.
- Chazal, J., & Rounsevell, M. (2009). Land-use and climate change within assessments of biodiversity change: A review. *Global Environmental Change*, 19 (2009) 306–315.
- Chen, X., Zhang, X.-S., & Li, B.-L. (2003). The possible response of life zones in China under global climate change. *Global and planetary change*, 38, 327–337.
- Collier, B., & al., e. (2012). Predicting patch occupancy in fragmented landscapes at the rangewide scale for an endangered species, an example of an American wrbler. *Diversity and Distribution*, 18, 158–167.
- Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América . (2000). *Evaluación de Recursos de agua de Guatemala*. Mobile: United States Southern Command.
- Custodio, B., & LLamas, E. (2001). *Recarga Hídrica*. Madrid: Mundiprensa.

- Daubenmire, D. (1988). *Ecología Vegetal. Tratado de autoecología de plantas*. México, D.F.: Limusa.
- de Groot, R. S., Alkemade, S., Braat, L., Hein, L., & Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological complexity*, 267-272.
- de Groot, R., Alkemade, R., Braat , L., Hein, L., & Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 7, 260-272.
- Deepak, R. (2006). Dry season clouds and rainfall in northern Central America: Implication on mesoamerican biological corridor. *Global and planetary change*, 54 (2006) 150–162.
- Defensores de la Naturaleza. (2004). *Programa de investigación de recursos hídricos de la Reserva de la biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Defensores de la Naturaleza.
- Dengo, G. (1968). *Estructura geológica, historia tectónica y morfología de América Central*. Guatemala : Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial.
- Dinerstein, E. O. (1995). *A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean*. Washington D.C.: The World Bank and WWF.
- Dix, M. A. (1997). Centres of Plant Diversity: A Guide and Strategy for Their Conservation. Volume 3: The Americas. En S. H.-M.-L. Davis, *Centres of Plant Diversity: A Guide and Strategy for Their Conservation. Volume 3: The Americas*. Cambridge, England: UICN Publication Unit.
- EEA. (2006). *Land accounts for Europe (1990-2000). Towards integrated land and ecosystem account*. Copenhagen: EEA.
- Estrada. (1999). *Distribución altitudinal de las comunidades forestales en la parte media de la subcuenca Río Raxón Tzunum (1200-2200 msnm), Reserva de biosfera Sierra de las Minas*. . Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.
- Fankhauser, S., Smith, J., & Tol, R. (1999). Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions. *Ecological economics*, 30, 67-78.
- FAO. (1992). *Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. Guía FAO Conservación*. México: FAO.
- FAO. (junio de 2015). *Sistemas de pago por servicios ambientales en cuencas hidrográficas*. Obtenido de FAO Corporat document repository: <http://www.fao.org/docrep/006/y5305b/y5305b03.htm>
- FIPA. (2002). *Valoración económica del servicio ambiental de regulación hídrica. Lado sur de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Guatemala*. Guatemala: Fortalecimiento en políticas ambientales, FIPA.

- Fisher, G., Shah, M., Tubiello, F., & Vehluizen, F. (Gu"nther Fischer1,* , Mahendra Shah1, Francesco N. Tubiello1,2 de 2005). Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. *Philosophical transactions, Royal Society* 360, 360, 2067–2083.
- Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16, 253–267.
- Foster, P. (2001). The potential negative impacts of global climate change on. *Earth sciences reviews*, 55 (2001) 73–106.
- Frumau, K., Bruijnzeel, L., & Tobon, C. (2006). *Hydrological measurement protocol for montane cloud forest. Annex 2, Final Technical Report DFID-FRP Project R7991*. Amsterdam: Vrije Universiteit.
- Fundación Defensores de la Naturaleza. (2003). *III Plan Maestro 2003-2008 de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Fundación Defensores de la Naturaleza.
- Fundación Defensores de la Naturaleza. (2010). *IV Actualización del Plan Maestro de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: FDN.
- Gallopin, G. (2006). *Los aspectos del desarrollo sostenible: Aspectos conceptuales y metodológicos*. Santiago, Chile: CEPAL.
- Gallopin, G. (2006). *Sostenibilidad del Desarrollo en América Latina y el Caribe: cifras y tendencias en Honduras*. Santiago, Chile: CEPAL, Nacione Unidas.
- García, G. (2007). *An ecohydrological and soils study in a montane cloud forest in the National Park of Garajonay, La Gomera (Canary Island, Spain)*. Amsterdam : Vrije Universiteit.
- Gonzales, O. (1999). *Estudio cualitativo de la composición forestal remanente entre 400 y 1200 msnm, de la subcuenca Río Raxón, Tzunum, Reserva de biosfera Sierra de las Minas, Panzos, Alta Verapaz*. Guatemala: universidad del Valle.
- Gordillo , C. (2010). *Situación actual y directrices para el manejo de tierras forestales de muy alta, alta y media captación y regulación hidrológica de Guatemala*. Guatemala: URL.
- Groot, R., Wilson, M., & Boumans, R. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* , 41, 393–408.
- GTZ. (2006). *Bases Conceptuales y Metodológicas para la Elaboración de una Guía Nacional de Ordenamiento Territorial* . Lima, Perú: GTZ.
- Guerra, A. A. (2010). *Climate-related disaster risk in the mountain areas: the Guatemalan highlands at stat of the 21st century*. Oxford: university of Oxford.
- Herrera, I. (1995). *Manual de Hidrología*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). *International Journal of Climatology*(25), 1965–1978.
- Hijmans, T., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 25, 1965–1978.
- Holdridge. (1971). *Ecología basada en Zonas de Vida*. Turrialba: ICTA.
- Hua Guo, Q. H. (2007). Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. *Journal of hydrology*, 106-122.
- IARNA. (2009). *Evaluación de la sostenibilidad del desarrollo en Guatemala*. Guatemala: IARNA.
- IARNA. (2009). *Sistema Cuentas Ambientales y Económicas Integrado. Cuentas Integrada de Tierras y Ecosistemas*. Guatemala: IARNA.
- IARNA/BANGUAT. (2009). *El sistema de contabilidad ambiental y económica integrada*. Guatemala: IARNA.
- IARNA-URL (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landivar). (2011). *Cambio climático y biodiversidad. Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico*. Guatemala 97, Guatemala : IARNA.
- IARNA-URL. (2005). *Situación del Recurso Hídrico en Guatemala. Documento Técnico del Perfil Ambiental*. . Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landivar.
- IARNA-URL. (2010). *Perfil ambiental de Guatemala*. Guatemala : IARNA.
- IARNA-URL. (2012). *Perfil ambiental de Guatemala* . Guatemala : IARNA URL.
- IICA. (2003). *El Enfoque territorial del desarrollo rural*. San José, Costa Rica: IICA.
- INSIVUMEH. (2001). *Cuantificación del recursos hídrico*. Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología .
- Instituto Nacional de Bosques. Guatemala. (2003). *Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural. Manual Técnico*. Guatemala: INAB.
- IPCC. (2000). *Escenarios de emisiones. Reporte especial del IPCC. Resumen para responsables de políticas*. New York: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (2001). Cambio Climático 2001: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes del grupo de trabajo II. En I. P. Climático., *Resumen para responsables de políticas Tercer Informe de Evaluación*. (pág. 80). Geneva, Switzerland: IPCC Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
- Janauer, G. (2000). Ecohydrology: fusing concepts and scales. *Ecological engineering*, 9-16.

- Jerneck, A., & Lenart, O. (2008). Adaptation and the poor: development, resilience and transition. *Climate Policy*, 8(2), 25-29.
- Jimenez, M. (2009). *Resiliencia de los ecosistemas naturales terrestres de Costa Rica al cambio climático*. Turrialba, Costa Rica : CATIE.
- Kappelle, M., & Brown, A. (2000). *Bosques nublados del neotrópico*. San José, Costa Rica: INBIO.
- Kimaro, D., Poesen, J., Msanya, B., & Deckers, J. (2008). Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Intertill and Rill erosion. *Catena*, 75 38–44.
- King, D., Chandler, C., Rappole, J., Chandler, R., & Melham, D. (2012). Establishing quantitative habitat targets for a 'Critically Endangered' Neotropical migrant (Golden-cheeked Warbler *Dendroica chrysoparia*) during the non-breeding season. *Bird Conservation International*, 22(2), 213-221.
- Komar, O., McCrary, J., Van Dort, J., Cobar, A., & Castillejo, E. (2011). *Winter ecology, relative abundance and population monitoring of Golden-cheeked Warblers (Dendroica chrysoparia) throughout the known and potential winter range. Draft final report*. Chiapas: Salvanatura.
- Lagerroos, D. (2004). Sustainability seen through an integral lens. *World Futures*,, 60, 319-325.
- Laukkonen, J., Kim Blanco, P., Lenhart, J., Keiner, M., Cavric, B., & Kinuthia-Njenga, C. (2009). Combining climate change adaptation and mitigation measures at the local level. *Habitat International* , 33 , 287-292.
- Lindsay, D. (2008). Habitat fragmentation and genetic diversity of an endangered, migratory songbird, the golden-cheeked warbler (*Dendroica chrysoparia*). *Molecular Ecology*, 17, 2122–2133.
- Linsley, R. J. (1988). *Hidrología para ingenieros*. México: Mc Graw Hill.
- Loening, L., & Markussen, M. (2003). *Pobreza, Deforestación y Pérdida de la biodiversidad en Guatemala*. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen.
- Lugo, A. E., Brown, S. L., Dodson, R., & Smith, T. S. (1999). The Holdridge life zones of the conterminous United States in relation to ecosystem mapping. *Journal of Biogeography*, 1025-1038.
- Lyons, J. (1990). *Winter habitat survey of the Golden-cheeked Warbler (Dendroica chrysoparia) in Guatemala*. Washington.
- Marcos, C. (1999). *Censo de Especies del género Quercus y su distribución geográfica en dos cuencas de la reserva de la biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Universidad del Valle.
- Martin, E. M. (2003). *Local Knowledge of Biodiversity and Water Conservation within Multi-Strata Coffee Agroforestry Systems, River Hato Watershed, El Progreso*

Department, Guatemala. University of Wales, Forestry . Wales: Forestry of University of Wales.

Martinez, N. y. (1998). *Hidrología Forestal*. Valladaolid: Universidad de Valladolid.

Mathewson, K. (2004). A century and counting: Geographical research on Guatemala a historical perspective. (L. S. Department of Geography and Anthropology, Ed.) *Geoforum*.

MDG Achievement Fund. (2010). *Metodología para el análisis de vulnerabilidad al cambio y a la variabilidad climática aplicada a un área piloto*. Bogotá, Colombia: MDG Achievement Fund.

Medinilla, O. E. (1999). *Estudio florístico de la comunidad de pino encino de la cuenca Río Colorado, Zacapa*. . Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

Millennium Ecosystem Assessment. (2005.). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington DC: Island Press.

Monslave, G. (2008). *hidrología en la ingeniería*. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.

Mundial, B. (2010). *Grupo del Banco Mundial*. Recuperado el 02 de noviembre de 2012, de <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/BANCOMUNDIAL>

Naciones Unidas. (2009). *Riesgo y pobreza en un clima cambiante*. Geneva: Naciones Unidas.

Neitsch, S., J.G., A., Kiniry, J., & J.R., W. (2001). *Soil and Water Assessment Tools (SWAT)*. 2000. Temple: Texas.

Nuñez, O. (2005). *Fondo del agua Sistema Motagua-Polochic*. Guatemala: Defensores de la naturaleza.

OMM, Organización meteorológica Mundial . (1994). *Guía de prácticas hidrológicas*. Washington: Organización Meteorológica Mundial.

Oudenhoven, A., Petza, K., Alkemadeb, R., Heina, L., & de Groot, R. (2012). Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. *Ecological Indicators*, 21, 110-122.

PNUD. (2011). *Programa de informes nacionales de desarrollo humano y de objetivos de desarrollo del milenio*. Recuperado el 02 de noviembre de 2011, de <http://desarrollohumano.org.gt/content/idh-en-guatemala>

Ponce, V. (1989). Modelos hidrológicos. En V. Pponce, *Engineering hydrology* (L. Lagrost, Trad., pág. Capítulo 13). Boston: Prentice Hall.

Postel, S., & Thompson, B. (2005). Watershed protection: Capturing the benefits of nature's water supply services. *Ecological Forum*, 95-108.

Pringle, C. (2001). Hydrological connectivity and management of biological reserves: a global perspective. *Ecological Applications*, 4, 981–998.

- Quay, R. (2010). Anticipatory Governance. A tool for climate change adaptation. *Journal of the American Planning Association*, 476(4), 496-511.
- Rappole, J., King, D., & Leimgruber, P. (2000). Winter habitat and distribution of the endangered golden-cheeked warbler (*Dendroica chrysoparia*). *Birdlife*, 201-210.
- Renault Adib, A. (2010). *Guía para la formulación y gestión de planes de desarrollo rural sostenible. Un abordaje participativo con énfasis en territorio*. Asunción, Paraguay: IICA.
- Rosito, J. (2006). *Evaluación hidrológica de las subcuencas Pueblo Viejo y Pasabien*. Guatemala: WWF/CARE.
- Rosito, J. (2010). *Monitoreo hidrológico, climático y de suelos de la cuenca Tecolután, proyecto PESH* WWF/CARE. Guatemala: WWF/CARE.
- Rosito, J. (2010). *Recopilación de información ecohidrológica de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Fondo de Agua.
- Rosito, J. C. (1999). *Estudio florístico, edáfico y geológico de la comunidad del cipresillo (*Taxus globosa Schlecht.*) en los cerros Pinalón, Guaxabajá y Mulujá de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Rosito, J. C. (2009). *Protocolo de monitoreo climático e hidrológico de la Cuenca Tecolután*. Guatemala: WWF CARE IRANA/URL.
- Rosito, J. C. (2010). *Monitoreo hidrológico en la subcuenca Tecolután / proyecto PESH*. Guatemala: WWF-CARE/IARNA.
- Rosito, J., & Cobos, C. (2011). *Aumento de la erosión hídrica relacionada con la pérdida de la cobertura natural en el área municipal de la subcuenca Tecolután*. Guatemala: s.e.
- Rosito, J., & Rodas, O. (2005). *Programa de investigación de hidrología forestal*. Guatemala : INAB.
- Rottach, P. (2011). *Antecedentes y componentes de la Reducción del riesgo a desastres*. Alemania: Diakonie Katastrophenhilfe.
- Sandoval, I. (1989). *Principios de riego y drenaje*. Guatemala: Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial mediante el balance hídrico de suelos. *Revista geológica de América Central*, 13-30.
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). Modelo analítico para la determinación de la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*(23), 43-55.
- Schuschny, A., & Soto, H. (2009). *Guía metodológica. Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible*. Santiago, Chile: CEPAL.

- Secretaria de ambiente y desarrollo sostenible . (2006). *Sistema de indicadores de desarrollo sostenible: República de Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Secretaria de ambiente y desarrollo sostenible de Argentina.
- SEMARNAT. (2011). *Identificación de reservas de agua potenciales para el medio ambiente en México*. Distrito Federal de México: SEMARNAT-WWF.
- Shiloh, F. (2009). *Climate-related impacts on national security in Mexico and Central America*. Londres: RUSI, Royal United Services Institute.
- SMEC Australia. (2007). *Climate change adaptation actions for local government* (Third ed.). Australia: Government of Australia.
- Standley, P., & Steyermark, J. (1964). *flora of Guatemala*. Chicago: Natural museum Fieldiana Botany .
- Tobón, C. (2009). *Protocolo de mediciones hidrologicas, de erosión y biológicas en la cuenca del río Jequetepeque, Perú*. Bogotá: Universidad nacional de Colombia.
- Toledo, E. (1997). *Fitodistribución de epífitas del género Tillandsia L. (Bromeliaceae: Tillandsioideae) en la Cuenca del Río Jones, Sierra de las Minas*. Guatemala: Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Turner, B., Kasperson, R., Matson, P., McCarthy, J., Corell, R., Christensen, L., . . . Kasperson, J. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. (PNAS, Ed.) *PNAS*, 100(14), 8074-8078.
- UNDP. (2002). *An adaptation policy framework. Capacity building for stage II adaptation*. New York: UNDP-GEF.
- UNFCCC. (2007). *Impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries*. Bonn, Germany: UNFCCC.
- United Nations. (2003). *Integrated Environmental and Economic Accounting, 2003*. New York: United Nations.
- USAID-MAGA. (2012). *Evaluación del potencial de aguas subterráneas de la República de Guatemala a escala de reconocimiento (1:250,000), como apoyo al desarrollo del riego agrícola en comunidades de pequeños y medianos productores* . Guatemala : USAID-MAGA.
- Van Dijk, A. (2003). *Ecohydrology. Course Reader*. Amsterdam: Vrije Universitet.
- Vargas, J. M. (2001). *Caracterización de la comunidad de helechos arborecentes en la cuenca del río Naranjo*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.
- Veliz, M. E., Cobar, A. J., Ramírez, F. J., & García, M. J. (2003). *La diversidad florística del Monte Espinoso de Guatemala* . Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, DIGI, Proyecto DIGUSAC 2.55 58 p.
- Vidal, R., Macías-Caballero, C., & Duncan, C. (1994). The occurrence and ecology of golden-cheeked warbler in the northern highlands of Chiapas, México. *Condor*, 96(3), 484-491.

- Vora, R. (1994). *Recommendations on management of Sierra de las Minas Biosphere reserve, Guatemala*. Guatemala: Defensores de la Naturaleza.
- WMO. (2006). *Technical regularions: Hydrology*. New York: World Meteorological Organization
- WMO. (2012). *El Tiempo el Clima y el Agua*. Gineva : OMM.
- Woodward, F., & Beerling, D. (1997). The dynamics of the vegetation change: health warnings for equilibrium 'dodo' models. *Global Ecology Biogeography Letters*, 6, 413–418., 413 - 418.
- WWF. (2007). *Valoración económica por los servicios hidrológicos en la subcuenca del río Tecolután, Guatemala*. Guatemala: World Wildlife Fund.
- WWF. (2008). *Estimación de la demenda de agua para riego en la cuenca Teculután*. Guatemala: WWF.
- WWF. (2009). *Determinación de la demanda actual y futura de agua para riego en la cuenca Teculután*. Guatemala : World Wildlife Fund Inc.
- WWF. (2012). *Valoración económica de los sercvicios económicos generados con la implementación del proyecto PESH*. Guatemala : World Wildlife Fund .
- Zalewski, M. (2000). Ecohydrology — the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecological Engineering*(16), 1-8.

Capítulo IV

Evaluación de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en cuatro subcuencas representativas de la RBSM

k) Contenido

Resumen	215	
1	Introducción	216
2	Objetivos	226
2.1	Objetivo general	226
2.2	Objetivos Específicos.	226
3	Metodología	227
3.1	Definición de los activos hídricos.	229
3.2	Definición de activos ecosistémicos.....	230
3.3	Definición del estado y rendimiento de los activos ecosistémicos a escala de las subcuencas estudiadas.	230
3.4	Conformación de matriz de cuentas ambientales y económicas integradas y análisis comparativo de subcuencas de estudio.....	231
4	Resultados y discusión	234
4.1	Activos físicos de la cuenta ambiental y económica del agua.....	234
5	Conclusiones y consideraciones finales	239
6	Bibliografía	241

Listas de Figuras

Figura 1. Marco simplificado del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica para el Agua (SCAE-Agua). Fuente: Naciones Unidas, 2013	220
Figura 2. Marco simplificado y modificado para evidenciar los servicios de regulación hidrológica en la RBSM.	228

Listas de Cuadros

Cuadro 1. Indicadores, dimensión, métodos y fuentes de información del sistema de cuentas ambientales y económicas integradas en subcuenca de la RBSM.....	232
Cuadro 2. Marco analítico integrado de activos y flujos de los recursos hídricos en las subcuenca (año 2008)	235
Cuadro 3. Indicadores de rendimiento de uso de los recursos hídricos.	236
Cuadro 4. Indicadores de rendimiento de uso de los recursos hídricos.	236
Cuadro 5. Marco analítico de activos ecosistémicos.	237
Cuadro 6. Indicadores de estado de ecosistemas y recursos hídricos.....	238

Resumen.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en cuatro subcuencas de la RBSM mediante la aplicación de sistemas de contabilidad ambiental.

Para alcanzar el objetivo del estudio fue necesario recopilar, generar e integrar información ecohidrológica y económica, de cada una de las subcuencas. Esta información fue organizada de acuerdo al marco analítico conceptual y metodológico propuesto por Naciones Unidas en su esfuerzo por constituir sistemas de contabilidad ambiental y económica integrada a nivel nacional (United Nations, 2003). En este proceso se utilizó como referencia específicamente los conceptos y marcos analíticos (matrices) presentados en el Sistema de Cuentas Ambiental y Económica para el Agua (SCAE-Agua) y el Sistema de Cuentas Ambiental y Económica para los Ecosistemas (SCAE-Ecosistemas). En este sentido se procedió a integrar las ventajas de ambos sistemas aplicándolos a cada una de las subcuencas representativas en la RBSM de tal manera que se pudiera establecer un análisis comparativo de escala regional.

En primera instancia se determinaron los activos físicos del agua. Para ello se utilizó como año base el 2008 y se integró la información de balance hídrico de suelos para cada subcuenca. Derivado de lo anterior se logró determinar la disponibilidad hídrica (agua accesible para la sociedad) de cada subcuenca.

A continuación se establecieron los flujos del agua, siendo un paso importante la recopilación e integración de información secundaria confiable respecto a valoraciones ambientales, estudios biofísicos y, especialmente, del uso del agua en los sitios de estudio. Asimismo se determinaron indicadores para evaluar el servicio de regulación hidrológica.

De manera complementaria se determinaron activos ecosistémicos y se definió el estado de las subcuencas estudiadas mediante la generación de indicadores, tal como la cobertura forestal, dinámica de ésta cobertura y la erosión potencial. El método de trabajo demostró ser muy útil para integrar, organizar y presentar información multidisciplinaria, logrando facilitar su comprensión y producir instrumentos de análisis y de gestión.

Se logró evaluar y priorizar, de una manera balanceada y objetiva sitios de acuerdo a los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica, basándose, principalmente en sus atributos ecohidrológicos y beneficios económicos y sociales a escala de subcuenca. En tal sentido se determinó que las regiones de sotavento y región de transición entre barlovento y sotavento son las que presentan menor cobertura relativa del bosque nuboso (15%) y son los que mayor demanda y dependencia tienen de sus servicios de recarga hídrica y regulación de caudales mínimos.

Destaca la subcuenca Tecolután por alto uso consumutivo del agua, mayor rendimiento económico por el uso del agua y que al mismo tiempo presenta alta sensibilidad del caudal de estiaje (época seca) por presentar baja proporción de ecosistemas que regulan este caudal y altas demandas de agua para riego. Destacan Pasabien y San Jerónimo por los altos consumos consumtivos y no consumtivos llegando al equivalente al 100% de sus caudales superficiales. Destaca Pueblo Viejo por los altos valores de exportación de agua y muy altos valores de erosión de suelos.

1. Introducción.

El presente acápite se inicia respondiendo a las siguientes preguntas: ¿Por qué estudiar servicios ecosistémicos hidrológicos en la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas? ¿Por qué utilizar principios y métodos del Sistema de cuentas económicas y ambientales para el agua (SCAE-Agua) para la caracterización, análisis y priorización de sitios críticos y estratégicos para la captación y regulación hidrológica? Posteriormente se describe en términos generales, como se desarrolló y los alcances de la presente investigación.

Síntesis de la Importancia de la Reserva de las Biosfera Sierra de las Minas.

- g) Conflictos por el acceso y uso del agua, especialmente en la parte sur (vertiente Motagua) y oeste (subcuenca San Jerónimo). Los conflictos se exacerbán en la época seca, es decir, marzo, abril y mayo. Se percibe que existen suficientes recursos hídricos, sin embargo, su distribución temporal y espacial no es la adecuada, ni tampoco la tecnología y organización para su distribución.
- h) Incendios forestales durante la época seca, especialmente en la región árida de la Sierra de las Minas, es decir en la vertiente del Motagua.
- i) Conflictos generalizados por uso y tenencia de la tierra.
- j) Escasez de información científica y económico-financiera para la fundamentación de instrumentos técnicos y financieros para la conservación efectiva, especialmente, alrededor de la zona núcleo.
- k) Se ha evidenciado (WWF, 2009) que la implementación de esquemas de pago o compensación por servicios ambientales a nivel local puede ser una alternativa viable para mejorar los procesos y generar fuentes de financiamiento alternativos. Asimismo existe un proyecto regional para el desarrollo del Fondo del Agua (Fundación Defensores de la Naturaleza, 2010), el cual es necesario fortalecer.
- l) Alta vulnerabilidad a eventos hidro-climáticos extremos, tanto de sequías prolongadas como eventos de precipitación extrema.

Bajo todo el contexto anterior se hace evidente la urgente necesidad de contar con más y mejor información biofísica, ecohidrológica y económica para RBSM que contribuyan significativamente a comprender, definir y gestionar los servicios ecosistémicos, con énfasis en los de regulación y provisión hidrológica. A continuación se presentan las preguntas fundamentales para el desarrollo de investigación ecohidrológica en sitios con las características de la RBSM: ¿Qué tan efectiva y eficiente es la conservación del área protegida? ¿Qué servicios ecosistémicos y consecuentes beneficios económicos tiene la conservación de los bosques con énfasis en los de regulación del ciclo hidrológico? ¿Cuál es el costo para conservar en forma adecuada estos ecosistemas, de acuerdo a su ubicación, geografía y nivel de amenazas? ¿Cuál es la relación costo beneficio en términos del bienestar humano? (Bruijnzeel et al, 2010)?() ¿Cómo hacer más eficiente y efectiva la conservación de servicios ecosistémicos? ¿Cuáles son las acciones y los sitios prioritarios? ¿Cuál puede ser el futuro de las interacciones entre los ecosistemas, el ciclo hidrológico y el clima?

Contabilidad ambiental y sistemas de cuentas ambientales. Herramientas para la integración de información ambiental y económica.

La contabilidad convencional incluye principalmente la cuenta de los recursos financieros, contabilidad con fines de la administración de activos y otras contabilidades afines. El ejercicio de la contabilidad convencional se aplica a unidades físicas y monetarias, incluyendo enfoques tales como, sistemas de planificación de la producción, los sistemas

de contabilidad de inventarios, sistemas de calidad y muchos más. La contabilidad convencional ofrece información relacionada al rendimiento económico como principal objetivo, mientras que el emergente tema de la contabilidad ambiental claramente tiene en cuenta los impactos ambientales relacionados con las diversas actividades económicas e incluye, como fundamentales, los aspectos de sostenibilidad (o agotamiento) de los bienes y servicio que provienen del sistema ambiental (Bennett et al 2002). ()

En la literatura existe diversidad de ejemplos de la adopción del marco de la contabilidad ambiental y se han desarrollado muchas propuestas, enfoques y definiciones. Lo que muestran en común estas aplicaciones es la integración de diversos tipos de información ambiental en términos monetarios y físicos, los cuales son organizados en marcos analíticos de acuerdo a los grupos de interés para los que está dirigida la información. Se ha evidenciado que es muy difícil y poco homogénea la aplicación práctica de la contabilidad ambiental, ya que es la aplicación de un sistema convencional de entradas y salidas simples y lógicas a un campo muy complejo, tal como el ambiental, asimismo se ha manifestado que la medición y captura de datos, así como la determinación de necesidades de los interesados es muy compleja y difícil de uniformizar y generalizar (Rachchh & Siddheshwar, 2014). Sin embargo el requerimiento del usuario debe ser una parte importante en la aplicación de la contabilidad ambiental y económica (United Nations, 2003)

La Organización de las Naciones Unidas ha desarrollado metodologías estándar de Contabilidad Económica y Ambiental (SCAE, “Sistema de Contabilidad Ambiental-Económica”) en la que se establecen criterios normalizados de contabilidad nacional (conceptos, definiciones, clasificaciones y reglas) que permiten la comparación a nivel internacional de las estadísticas medioambientales y su relación con la economía. Bajo el marco del SCAE, se confeccionaron un “sistema satélite” específico para los “bienes naturales”, tal como el bosque, el suelo, el agua, energía, etc. (Naciones Unidas, 2013). Entre los principales fines y alcances de estos complejos y novedosos ejercicios de creación de sistemas de contabilidad económica y ambiental integrados están de dotar de instrumentos estratégicos para incorporar el tema de sostenibilidad a las políticas de económicas y de desarrollo dentro del sistema de toma de decisiones que convencionalmente rigen a los países (United Nations, 2004; Weber, 2007).

Dichas cuentas ayudan, principalmente a clarificar y cuantificar el uso del ambiente en un sentido amplio, tanto los bienes incorporados al mercado como los servicios [ecosistémicos], los cuales generalmente no están internalizados por la economía. Para el desarrollo y aplicación de SCAE se cuenta con ejemplos internacionales en los que proponen métodos y clasificaciones que han probado ser una herramienta útil para organizar gran cantidad de información y/o bases de datos del tema ambiental (Weber, 2007; Boyd & Banzhaf, 2007).

Es importante destacar que la escala de aplicación del SCAEI, generalmente es nacional porque uno de sus fines principales es que sea compatible con el Sistema de Cuentas Nacional (SCN) de los diferentes países. Sin embargo los principios y métodos son aplicables a cada una las unidades geográficas de análisis, tal como se presenta más adelante en el desarrollo de la cuanta de Agua. Para que el ejercicio de la contabilidad ambiental sea útil para el análisis profundo de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica se considera importante tomar en cuenta los principios, conceptos y métodos de dos cuentas, la de agua y la de ecosistemas. Esto se justifica durante la presentación de ambas cuentas ambientales a continuación.

Sistema de cuentas ambientales y económicas para el agua (SCAE-Agua).

Esta iniciativa fue desarrollada como respuesta a la creciente competición con respecto a los recursos hídricos en los sectores agrícola, urbano e industrial, a consecuencia del crecimiento de la población, ha redundado en presiones sin precedentes sobre los recursos hídricos, y muchos países padecen escasez de agua o tropiezan con límites en su desarrollo económico. Tal como sucede en los sistemas de cuentas nacionales, las cuentas satélites ambientales y, en este caso específico, las cuentas del agua, proveen información precisa sobre cómo se intercambia el agua entre el ambiente y el sistema económico (extracciones y retornos), cómo se distribuye entre los diferentes componentes del medio natural (lagos, ríos, acuíferos, mares y océanos), y cómo es utilizada por parte de los diferentes tipos de actividades económicas o domésticas (Naciones Unidas, 2013).

El Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica para el agua (SCAE-Agua) proporciona, entonces, un marco conceptual para organizar de manera coherente y sistemática la información sobre cuestiones hídricas y económicas. La ventaja de esos vínculos es que proporcionan un instrumento para integrar los análisis ambientales y económicos y superar la tendencia a fragmentar los temas asignándolos a distintas disciplinas, lo cual ocurre cuando los análisis de cuestiones económicas y de cuestiones ambientales se realizan independientemente los unos de los otros (Naciones Unidas, 2013). En muchos países, tal como en Guatemala ya se cuenta con experiencias en la realización de ejercicios de implementación de SCAE y se considera que son útiles para la fundamentación y formulación de políticas de desarrollo y sostenibilidad (IARNA, 2009).

En la mayoría de las experiencias en la aplicación del sistema de cuentas se ha implementado a nivel nacional, sin embargo, la aplicación de las políticas hídricas se pone en práctica en zonas definidas por sus atributos biofísicos para la gestión del agua; por ejemplo, una subcuenca fluvial. En el marco de cuentas de agua es poca la experiencia recogida en la agregación de esos valores locales hasta llegar a nivel nacional. Esto se considera como determinante para la aplicación de políticas de sostenibilidad ya que el valor y el uso de los recursos hídricos están determinados por características y opciones de utilización a nivel local y regional, específicas para cada ubicación (Naciones Unidas, 2013), además de la vinculación de la regulación hidrológica con otros bienes o activos ambientales, tal como el bosque, el suelo, salud de los ecosistemas, etc.

La especificidad respecto de la ubicación que caracteriza los valores -y el uso- del agua significa que no puede presumirse que los parámetros estimados para una zona de un país tengan validez en otra u otras. Esto suscita un problema en la preparación de las cuentas del agua a nivel nacional, ya que el método comúnmente empleado para las cuentas nacionales: llevar a escala nacional los datos obtenidos por muestreo, no puede aplicarse con tanta facilidad. Lo más certero y útil para los responsables políticos es preparar las cuentas del agua a nivel de subcuenca fluvial o de subcuenca de captación, para las que puede compilarse información económica, y proceder a la agregación de esos datos hasta llegar al nivel nacional a fin de obtener cuentas nacionales de los recursos hídricos (Naciones Unidas, 2013).

Las cuentas para subcuencas fluviales pueden resultar más útiles para los responsables políticos debido a que muchas decisiones administrativas se adoptan a nivel de subcuenca fluvial y a que incluso las políticas a nivel nacional deben tomar en cuenta las variaciones regionales en materia de suministro, demanda y valor del agua (Naciones Unidas, 2013; IARNA, 2009).

Por otro lado, la disponibilidad y la demanda de agua, así como su calidad, pueden variar en gran medida a lo largo del tiempo y a través del espacio. Es difícil abordar la cuestión de la sostenibilidad de los recursos hídricos a nivel nacional cuando tal sostenibilidad queda determinada a nivel local o regional. Al reconocer esta situación, los administradores de recursos hídricos han ido adoptando un enfoque regional para tomar en cuenta las variaciones a lo largo del tiempo. Dicho enfoque suscita dificultades para la contabilidad del agua debido a que las dimensiones temporales y espaciales pertinentes al agua con frecuencia no coinciden con las empleadas para los datos económicos en las cuentas nacionales.

Es cada vez más frecuente que los países准备 las cuentas del agua sobre bases regionales; Australia, los Países Bajos, Suecia y Marruecos ya lo han hecho. Uno de los siguientes pasos es la incorporación de variables temporales en la elaboración de cuentas del agua con variaciones estacionales (Naciones Unidas, 2013). Resulta importante desarrollar la capacidad de realizar cuentas a nivel local para ir acumulando datos a escalas regional y nacional.

Para llevar a cabo la elaboración de cuentas del agua a nivel de subcuencas fluviales, en términos generales, se requiere de datos geográficos (espacialmente explícitos) de referencia acerca de los activos, su variación espacial y temporal del agua. Asimismo de los flujos del agua hacia el ambiente y sectores socioeconómicos, y, finalmente la descarga de contaminantes, es decir, una individualización con localización espacial de establecimientos, centrales de tratamiento de aguas residuales, etcétera (Naciones Unidas, 2013; IARNA, 2009).

A continuación se presenta el marco, simplificado, para el SCAE-Agua. El cual ofrece aspectos que se pueden tomar importantes para realizar la cuenta a escala de subcuenca. Sin embargo es necesario hacerle adaptaciones si se quiere aplicar a escala de subcuenca fluvial.

Sistema de Cuentas Ambientales y Económicas de los Ecosistemas (SCAE-Ecosistemas)

A nivel global han cobrado relevancia diversas iniciativas que vinculan el análisis del estado actual de los ecosistemas con políticas de desarrollo sostenible y conservación. Un ejemplo de esto son las evaluaciones de la condición, dinámica y evolución futura de los servicios ecosistémicos que fueron completadas por los científicos de todo el mundo teniendo como resultado final la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (CEPAL, 2004).

Este trabajo señala una alarmante preocupación por el futuro del planeta tierra y la continua pérdida de biodiversidad, altos riesgos al cambio climático y una nueva percepción mundial de escasez de recursos naturales vinculados con el rápido crecimiento de economías emergentes.

Un aspecto relevante de dicho trabajo es que utiliza y difunde el concepto de bienes y servicios ecosistémicos, yendo mucho más allá del de recursos naturales (generalmente incorporados al sistema de mercado), el cual es utilizado ampliamente por las ciencias económicas. Es decir que se plantea el nuevo enfoque de generar una contabilidad donde los recursos y bienes de la naturaleza (como un capital fijo) no son solo parte de un inventario de materiales disponibles para su extracción (Weber, 2007; United Nations, 2004).

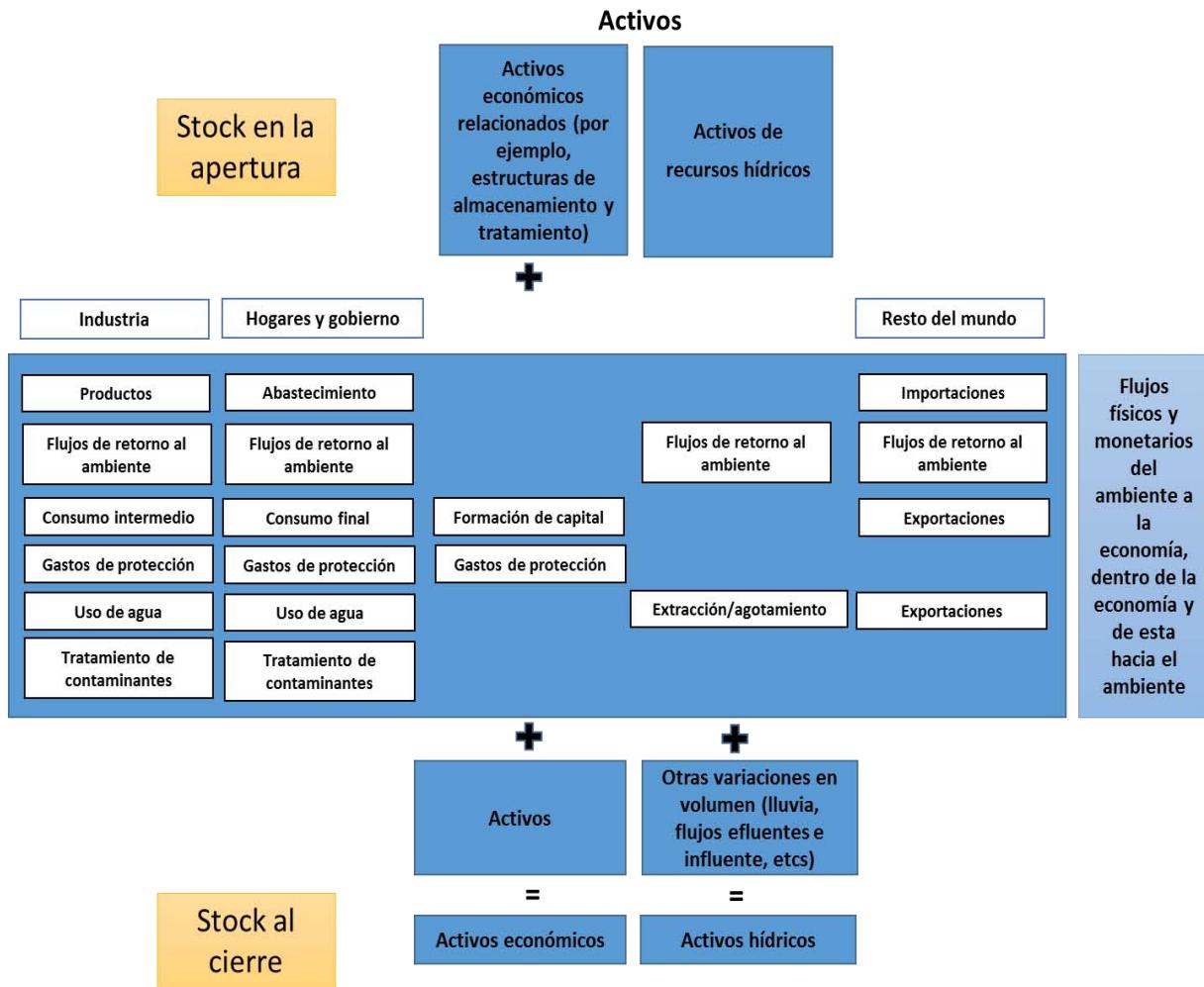


Figura 36. Marco simplificado del Sistema de Contabilidad Ambiental y Económica para el Agua (SCAE-Agua). Fuente: Naciones Unidas, 2013.

La cuenta de ecosistemas considera los bienes ambientales desde una perspectiva diferente al SCAE usual, donde “se entiende por activos ambientales los componentes vivos y no vivos de origen natural, que en su conjunto constituyen el ambiente biofísico, que puede proporcionar beneficios a la humanidad”. En la cuenta de ecosistemas se incorporan los beneficios no materiales que tienen implicaciones en la medición de los activos en términos físicos y en su valoración (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2013; European Comission and World Bank, 2013)

La contabilidad de los ecosistemas se fundamenta sobre las relaciones entre los stocks y flujos de sus activos. El stock de un ecosistema es representado por el capital natural inicial o final del ecosistema. Los flujos son de dos tipos: el primero, refleja como la sociedad toma ventaja sobre los múltiples recursos y procesos generados por los ecosistemas (servicios). Segundo, se refiere a los cambios en el capital del ecosistema en un periodo contable, debido a procesos naturales o de intervención humana (positiva o negativa). Los flujos de los servicios proveen un vínculo entre el capital del ecosistema y los beneficios usados y disfrutados por la sociedad. La cantidad y/o calidad de los servicios ambientales influyen en el nivel de bienestar de la sociedad (Naciones Unidas, 2013).

A continuación se presentan algunos conceptos fundamentales en la implementación de la cuenta de ecosistemas. Cabe destacar que esta cuenta aún se considera experimental y está en desarrollo. Sin embargo se tiene algunas experiencias desarrolladas y la propuesta de principios y conceptos, entre los cuales destacan los siguientes.

El ecosistema se concibe como "un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y su medio físico, con el que interactúan como una unidad funcional. Según la Convención "sobre la Diversidad Biológica Diversidad" llevada a cabo en 2003. Los servicios de los ecosistemas se definen como los aportes de los ecosistemas a los beneficios utilizados en la vida económica y en las actividades humanas. Por lo general, se dividen en las categorías de aprovisionamiento, regulación y servicios culturales (Weber, 2007).

Servicios de aprovisionamiento reflejan contribuciones materiales y energéticas generadas por, o, en un ecosistema. Por ejemplo, un pescado o una planta con propiedades farmacéuticas. Los servicios de regulación son el resultado de la capacidad de los ecosistemas para regular el clima, ciclo hidrológico y otros ciclos biogeoquímicos, procesos de la superficie de la tierra, y una variedad de procesos biológicos. Estos servicios a menudo tienen una dimensión espacial importante. Por ejemplo, el servicio de control de inundaciones de un bosque ubicado en la parte alta de una cuenca es relevante en la zona de inundación aguas abajo.

Los servicios culturales son generados a partir de los ajustes físicos, lugares o situaciones que dar lugar a beneficios intelectuales y simbólicos que la gente obtiene de los ecosistemas a través de recreación, el desarrollo del conocimiento, la relajación y la reflexión espiritual. Esto puede implicar visitas reales a una zona, disfrutando indirectamente el ecosistema (por ejemplo, a través de las películas de la naturaleza), o ganando la satisfacción de saber que un ecosistema que contiene una importante biodiversidad (European Comission and World Bank, 2013)

La contabilidad de los ecosistemas se constituye, entonces, en "un enfoque coherente e integrado para la evaluación de la medio ambiente a través de la medición de los ecosistemas y la medición de los flujos de servicios de los ecosistemas en la actividad humana económica y viceversa". La contabilidad de Ecosistemas va más allá de otros enfoques para el análisis y la evaluación de los ecosistemas a través de la vinculación explícita de los ecosistemas a la actividad humana económica y otra. Los enlaces se ven tanto en términos de los servicios que prestan los ecosistemas y también en los impactos que la actividad humana económica puede tener sobre los ecosistemas y su capacidad futura (European Comission and World Bank, 2013; EEA, 2006)

Esta contabilidad implica integrar diferentes bases de datos bajo una estructura común, lo cual ayuda a manejar, problemas intersectoriales en toda la economía, así como los vínculos entre los ecosistemas y la economía. Por ejemplo cuando una actividad económica depende del suministro de servicios ecosistémicos específicos. La medición y valoración de los servicios ecosistémicos se puede hacer por diferentes fines, tales como el seguimiento de los cambios en los servicios o hacer un análisis de costo-beneficio de un proyecto.

Ejemplos de situaciones en las que la contabilidad de los ecosistemas es apropiada para ayudar, especialmente al desarrollo o reorientación de determinadas políticas son los siguientes:

- a) El diseño de un Pago por Servicios Ambientales (PSA).

- b) Determinar compensaciones por determinados usos del suelo, por ejemplo, decidir si desea proteger zonas naturales o si la minería o las actividades agrícolas pueden coexistir de manera sostenible con otros usos de la tierra y cómo esto se puede lograr.
- c) La estimación de los impactos en toda la economía de los cambios en un ecosistema, como la construcción de un presa o instituir otros cambios importantes de uso del suelo.

Las cuentas de los ecosistemas pueden ser un instrumento menos apropiado cuando el tema en cuestión implica una muy pequeña unidad espacial o administrativa o en la que no es necesaria la exhaustividad de las cuentas. Del mismo modo, cuando es necesario comprender los impactos en el bienestar de un proyecto, entonces las cuentas deben complementarse con medidas de impactos en el bienestar (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2013; European Comission and World Bank, 2013).

Es claro que la contabilidad de los ecosistemas va más allá del marco central del SCAE en términos de cómo se registra el capital del ecosistema. En particular, la contabilidad de los ecosistemas incluye un conjunto integral de servicios de los ecosistemas (en particular, la regulación y servicios culturales), y representa explícitamente los cambios en el stock de capital de los ecosistemas. El balance del capital de los ecosistemas está relacionada con la capacidad del ecosistema para generar servicios ecosistémicos en la actualidad y en el futuro (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2013; European Comission and World Bank, 2013).

Esto también permite un tratamiento más sistemático de análisis de la Contabilidad de la degradación y rehabilitación de ecosistemas: estos dos aspectos son se reflejan en la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios. De esta manera, la contabilidad del ecosistema proporciona una herramienta completa para analizar la sostenibilidad del uso de los recursos naturales. Una característica de la contabilidad de los ecosistemas es que generalmente está basado en un enfoque espacialmente explícito, seguido, del reconocimiento de la gran diversidad espacial de los ecosistemas y los servicios que prestan. Por ejemplo, la regulación de Agua (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2013; European Comission and World Bank, 2013).

El tema específico de la regulación del agua comprende toda una gama de diferentes servicios, incluyendo el control de inundaciones, el mantenimiento de los flujos de la estación seca, y el control de la calidad del agua (por ejemplo, reducir las tasas de sedimentación). Los períodos de retorno de las lluvias intensas, es decir, que la variación intra-anual de lluvias es particularmente importante para este servicio. Por ejemplo, dependiendo de las precipitaciones, la importancia del servicio de control de inundaciones puede variar fuertemente entre años. Además, el control de inundaciones normalmente ocurre sólo durante algunos meses específicos del año. Cabe señalar también que los bosques pueden tener una serie de efectos relacionados: algunos bosques reducen la disponibilidad de agua durante todo el año (debido a las altas tasas de evaporación en comparación con otros ecosistemas), pero aumentar la disponibilidad de agua durante la estación seca (amortiguador) (European Comission and World Bank, 2013).

Además, este servicio tiene una alta variabilidad espacial e interdependencia. Por ejemplo, los bosques cercanos a cursos de agua pueden ser relativamente mucho más importantes para los servicios hidrológicos en comparación con los bosques más lejanos a la corriente del agua. Asimismo, cortando algunos de los bosques en una cuenca hidrográfica es probable que el cambio el servicio hidrológico de otras partes boscosas de la subcuenca

(por ejemplo, el agua fluye a través de estos otros parches de bosque). Por lo tanto, el modelado de este servicio es a menudo intensivo de datos y también analíticamente compleja. Idealmente, un modelo de escorrentía se define por píxel la contribución de la vegetación en ese píxel a mantenimiento de los flujos de agua río abajo. Es importante destacar que, tal modelo necesita tener en cuenta toda el agua está en constante movimiento: la lluvia, la intercepción, la evapotranspiración, el flujo superficial, flujo en la zona no saturada, el flujo en la zona saturada, y el arroyo (European Comission and World Bank, 2013).

Aplicación del SCAE-Agua y SCAE-Ecosistemas en el marco de caracterización de servicios ecosistémicos de regulación hidrológica y priorización de cuatro subcuenca en las RBSM.

Ambas propuestas metodológicas aportan aspectos favorables para concretar los objetivos de esta investigación, es decir, caracterizar el servicio de regulación hidrológica a escala de subcuenca.

La implementación de aspectos metodológicos de la cuenta SCAE-Agua puede aportar los siguientes aspectos (Naciones Unidas, 2013):

- Propone aspectos favorables para manejar coherentemente los datos, tal como como un balance hídrico. Esto se considera adecuado para hacerlos comprensibles para los actores de interés o involucrados en su análisis.
- Se recomienda aplicar la cuenta a escala espacial de subcuenca, por ser esta la unidad de respuesta hidrológica y además fácilmente delimitable. Se considera adecuado aplicarla escalas temporales anuales y se recomienda experimentar con escalas temporales menores, estacionales o trimestrales.
- El objetivo principal de los marcos de análisis (matrices) le dan seguimiento específico al agua, desde que entra al sistema natural, su utilización como insumo o producto final en el sistema económico y, finalmente, es retornada nuevamente al sistema natural.
- No se basa en métodos de valoración indirectos, más bien describe el servicio de provisión directa del agua.
- Propone resolver el problema de la movilidad de los recursos hídricos en una subcuenca fluvial considerándolos como cero en el stock de apertura y cero al cierre.

Entre las principales desventajas del SCAE-Agua se encuentran:

- No considera al sistema de subcuenca como un activo, más bien propone que los activos físicos y monetarios iniciales sean la inversión preexistente (por ejemplo infraestructura).
- Es necesaria información de infraestructura de almacenamiento, tratamiento y distribución de agua, la cual generalmente es de difícil acceso y estimación, al menos para el caso de la RBSM.

Entre las ventajas de la propuesta metodológica del SCAE-Ecosistemas, se encuentran las siguientes (European Comission and World Bank, 2013).

- Considera como un activo a los ecosistemas definidos.
- Privilegia a los servicios ecosistémicos y su estado o calidad, aunque no tengan valor en el mercado.
- Está diseñado para conocer implicaciones en el futuro respecto a los activos, servicios ecosistémicos que proporciona, así como de sus flujos en la economía y hacia otros ecosistemas.

Entre las desventajas del SCAE-Ecosistemas se encuentran:

- El SCAE-Sistemas ha sido desarrollado, principalmente, para analizar servicios de regulación y culturales, más que los servicios de provisión.
- No se recomienda aplicarlo a escalas espaciales muy pequeñas. Asimismo, la escala temporal de análisis es generalmente muy amplia, la cual puede oscilar entre mayor a un año y 10 años. Sus métodos de evaluación no son prácticos en su aplicación para evaluar plazos menores.
- Se pretende abarcar la mayor cantidad de servicios ecosistémicos posible, desde la biodiversidad, fijación de carbono, recreación, fijación de nutrientes, recreación, etc.
- La estimación económica se basa en valoración indirectas de los bienes y, como ya se mencionó, especialmente de los servicios ecosistémicos de regulación y culturales, no así los de provisión.
- Es altamente dependiente del análisis geográfico, espacialmente explícito y detallado o de modelaciones biofísicas (propone los modelos de SWAT, SWAP, INVEST, etc.), los cuales son de uso poco práctico para evaluaciones anuales, estaciones climáticas o trimestrales.

Bases para el desarrollo metodológico de esta investigación.

Conocer y evidenciar, ante diversidad de actores, la interacción del ciclo hidrológico con los ecosistemas terrestres y el papel de éstos en la regulación hidrológica, y, consecuentemente, beneficio económico e impactos ambientales por parte del sistema social; es un asunto muy complejo, multidisciplinario y, evidentemente, innovador. Entre los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica que necesitan ser más conocidos, mejor comprendidos e incorporados a políticas de conservación se encuentran, principalmente, la disponibilidad hídrica para la sociedad, así como en la disminución de los efectos negativos durante eventos hidroclimáticos extremos (tanto lluvias intensas y como sequías);

En tal sentido se hace necesario recurrir al apoyo de diferentes disciplinas y métodos no convencionales, al menos no de utilización generalizada, que sean capaces de integrar por un lado, información biofísica, ecológica e hidrológica y, por otro lado, información socioeconómica.

Para analizar los procesos biofísicos y funciones ecológicas de los ecosistemas, especialmente las vinculadas a la regulación del ciclo hidrológico es preciso apoyarse en la ecohidrología.

Por el otro lado para analizar las interacciones entre los ecosistemas existentes, enmarcados en una entidad física claramente delimitada llamada subcuenca, y el agua como un recurso económico que genera beneficios económicos y es objeto de impactos de degradación y agotamiento por el uso de ésta como un recurso, es necesario apoyarnos en los principios de la contabilidad ambiental.

Respecto a la contabilidad ambiental, como se ha podido evidenciar, las propuestas metodológicas SCAE-Agua y SCAE-Ecosistemas presentan ventajas para cumplir los objetivos del presente estudio. Consecuentemente se propone hacer una combinación de ambas, basándose en SCAE-Agua para utilizar el marco de trabajo de una subcuenca con énfasis en el servicio de provisión hidrológica. Los aportes del SCAE-Ecosistemas serán para resaltar el papel de los ecosistemas en procesos de regulación hidrológica. Es importante considerar el papel fundamental que tiene la disponibilidad de información básica y confiable para la elaboración de los marcos analíticos correspondientes.

A continuación se presentan los procesos metodológicos que describen la lógica y factibilidad de la implementación de la investigación. Posteriormente se describen las dificultades, desventajas y vacíos de información que se evidenciaron durante la implementación de la metodología. Para concluir con las recomendaciones para seguir estudiando las interacciones entre el ciclo hidrológico y el clima, al mismo tiempo que se apoyan esfuerzos de conservación de ecosistemas críticos.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en cuatro subcuenca representativas de la RBSM.

2.2 Objetivos Específicos.

- Definir los activos hídricos.
- Definir los activos ecosistémicos.
- Integrar información de activos, flujos e indicadores del estado, regulación hidrológica y rendimiento monetario de las actividades económicas relacionadas con el uso del agua en cuadros de contabilidad ambiental en subcuenca seleccionadas
- Realizar un análisis comparativo de las subcuenca bajo análisis.

3. Metodología

Basándose en las ventajas y desventajas de las cuentas de Agua (SCAE-Agua) y Ecosistemas (SCAE-EE), propuestas y actualizadas recientemente por Naciones Unidas para el desarrollo de Sistemas de Cuentas Ambientales y Económicas (SCAE), se proponen las siguientes consideraciones.

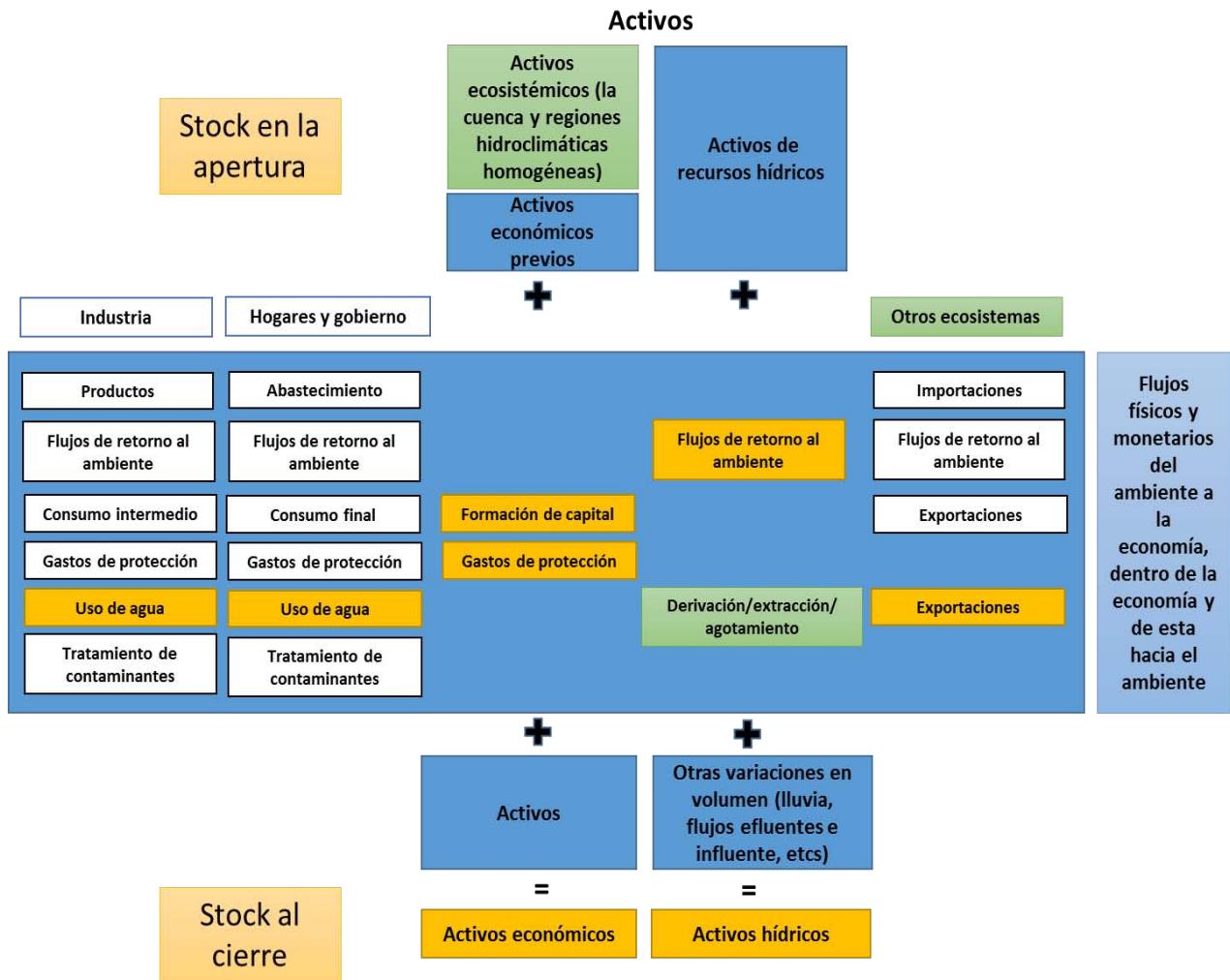
- Seguir la recomendación explícita en el SCAE-Agua de experimentar y proponer formas de trabajar a escala de subcuenca local (entre 10,000 y 50,000 ha), siendo estas unidades biofísicas componentes que pueden integrarse para conformar cuentas regionales y nacionales. Además la SCAE-Agua ofrece los marcos analíticos y escalas temporal y espacial que se consideran más adecuadas.

Esto es fundamental para que la presente propuesta se constituya en un piloto que sea un modelo, que encuentre los puntos débiles a mejorar, tal como vacíos de información; de tal manera que pueda ser replicada continuamente (trimestral o anualmente) y en un futuro próximo ampliar su aplicación para generar un sistema de cuentas regionales para la RBSM (con énfasis en su papel como reguladora del ciclo hidrológico).

- Los marcos analíticos propuestos por el SCAE-Agua se consideran más adecuados para realizar análisis comparativos entre subcuenca, así como para presentar a los actores locales la integración de información para su manejo, comprensión y propuesta y fomento de políticas de conservación y desarrollo sostenible regional e incluso nacional.
- Es importante resaltar el papel de las subcuenca en la regulación hidrológica y el papel que juegan los ecosistemas en la regulación hidrológica.

Se considera que es lo más adecuado basarse en el marco conceptual de la SCAE-Agua, integrar algunos aspectos del enfoque de SCAE-Ecosistemas. La integración y ligeras modificaciones del marco conceptual de la SCAE-Agua, obedecen, principalmente, a la escala de implementación y a la información disponible, o que se puede generar, actualmente.

De acuerdo al marco simplificado y adaptado de la SCAE-Agua (Cuadro 3) se puede apreciar en recuadros azules y blancos, el manejo de la información propuesto por Naciones Unidas (Naciones Unidas, 2013). En los cuadros verdes se presentan las ligeras modificaciones para cumplir los objetivos de este trabajo. En cuadros naranja se pueden apreciar los aspectos que serán prioritarios para obtener, de acuerdo a la información disponible actualmente.



En los cuadros verdes se presentan las ligeras modificaciones a la propuesta de SCE-Agua de ONU, para cumplir los objetivos de este trabajo. En cuadros naranja se pueden apreciar los aspectos que serán prioritarios para obtener, de acuerdo a la información disponible actualmente. En cuadros blancos identifican aspectos no priorizados o que no aplican al presente ejercicio.

Figura 37. Marco simplificado y modificado para evidenciar los servicios de regulación hidrológica en la RBSM.

Entre los aspectos modificados (cuadros en verde) se encuentran los siguientes:

- El objetivo primordial del marco conceptual es realizar la contabilidad ambiental del servicio ecosistémico de provisión de agua.
- En tal sentido se describen los ecosistemas dentro de los activos económicos (como infraestructura de regulación) con los que se cuenta en el stock de apertura. Podemos considerar que el hecho que no se tenga cuantificado económicamente el valor económico de los ecosistemas en función del servicio ecosistémico, no significa que este no tenga valor económico. Este es un problema que se deberá resolver en el futuro. Para este ejercicio consideramos importante describir el activo, categorizando el ecosistema de acuerdo a sus funciones hidrológicas.

- Las exportaciones se considera al agua que fluye a otros ecosistemas. Esto es bastante obvio ya que la escala de trabajo es la unidad biofísica de la subcuenca.
- En el recuadro ubicado en la intersección de la columna de activos físicos y columna de uso del agua, se agrega la palabra derivación a los términos empleados anteriormente, por contar este con mayor precisión técnica hidrológica.

Además de los anteriores aspectos, también serán prioritarios (cuadros naranja) para obtener y, consecuentemente, para organizar y presentar la información, los siguientes aspectos:

- Totalización de los usos de agua por parte de las industrias incluyendo la agricultura de exportación y los hogares.
- Formación de capital por parte de las actividades agrícolas, de energía y otras desarrolladas en cada una de las subcuenca.
- Exportación física de agua a otros ecosistemas.
- Definición de activos económicos y físicos totales.

Es importante mencionar que por la disponibilidad y naturaleza de la información no fue posible obtener información anual durante varios años, lo cual es lo deseable. Sin embargo se utiliza de referencia la información obtenida y se considera que la mayor parte de la información física y monetaria es aplicable al año 2007. Además puede ser utilizada como línea base para establecer próximos ejercicios de contabilidad ambiental.

3.1 Definición de los activos hídricos.

Para la caracterización de los recursos hídricos se procedió integrar la información de balances hídricos de suelos de las cuatro subcuenca definidas. Para tal fin se usó como una de las principales referencias generada y presentada en el Capítulo III.I

Para el rubro de aumentos en el stock se consideraron aquellas entradas de agua al sistema subcuenca. Los indicadores más adecuados para describir los activos hidrológicos fue en primer lugar: disponibilidad hídrica, el cual para el presente estudio, es equivalente a la recarga hídrica más la escorrentía. Además también se utilizó el caudal promedio histórico para el punto de aforo estimado para el 2008, año de referencia o año base. Es importante mencionar que se emplearon datos promedio históricos provenientes de fuentes secundarias, lo cual se consideró adecuado ya que ese año no fue un año climático extremo y los valores requeridos son de referencia. En un futuro podrán utilizarse datos empíricos anuales para realizar análisis en este mismo período, que es lo deseable para ser alcanzado.

También se determinaron los flujos a la economía. Este rubro se dividió en dos componentes, los cuales son: a) uso no consumtivo, es decir que el agua se utiliza y es regresada al mismo sistema de subcuenca evaluado; y, b) uso consumtivo, el cual consiste en el agua que se emplea y se consume si ser retornada al sistema hídrico. Para la primera categoría como actividades importantes de este tipo están las hidroeléctricas establecidas. Para la segunda categoría, uso consumtivo, se consideraron aquellas actividades con altos consumos de agua que pudieron ser estimados, tales como agricultura bajo riego, agricultura de secano, consumo de hogares y otros usos. En este último rubro se pudo obtener muy poca información, ya que escasa su documentación accesible. Todos los valores de flujos a la economía fueron comparados con el caudal anual superficial como referencia. En el caso del rubro de agricultura de secano es importante destacar que únicamente se utiliza como un valor de referencia respecto al caudal superficial, este valor

no significa extracción de recursos hídricos de alguna fuente sin más bien utilización del agua de lluvia.

3.2 Definición de activos ecosistémicos.

Para la definición de activos ecosistémicos se procedió a clasificar a los grandes ecosistemas de la RBSM de acuerdo a sus atributos hidrológicos. En el Capítulo III ya se han establecido los dos tipos de servicios ecosistémicos de regulación hidrológica claramente identificables:

a) regulación de caudales mínimo y recarga hídrica; el cual incluye la regulación de largo plazo y flujo básico. Este servicio del ecosistema de bosque nuboso supone láminas altas de recarga (más 850 mm/año) y durante períodos prolongados (alrededor de 8 meses). Esta lámina de recarga hídrica significativas por la magnitud y por la época en que suceden, considerando que está directamente vinculada con el flujo hídrico superficial o subterráneo y provisión de agua en época de estiaje (seca) y,

b) regulación de caudales máximos y erosión (flujo hídrico instantáneo), el cual está relacionado con el amortiguamiento del impacto de la ocurrencia de precipitaciones de altas intensidades (mayores a la infiltración básica de referencia de 20 mm/hora) en sitios generalmente con suelos poco desarrollados o con altas pendientes o susceptibles a erosionarse por cualquier factor de erosión. Consecuentemente este servicio ecosistémico se vincula directamente con la disminución significativa de la erosión y control de crecidas e inundaciones.

De acuerdo a la clasificación presentada en el Capítulo II y III, los ecosistemas vinculados directamente al servicio de regulación de caudales mínimos y recarga hídrica anual (regulación de largo plazo), son aquellos clasificados como: Bosque nuboso tropical montano de altura (UMCF, por sus siglas en inglés). Para delimitación y cuantificación de estos ecosistemas se tomaron criterios altitudinales, de 2100 msnm o más para sotavento y zona de transición; y de 1500 msnm o más para barlovento.

Los ecosistemas vinculados a la regulación de caudales máximos y erosión (del flujo hídrico instantáneo) son los denominados Bosque nuboso tropical montano bajo (LMCF, por sus siglas en inglés) y Bosque húmedo montano bajo (LMHF, por sus siglas en inglés), éste último únicamente presente en sotavento y comúnmente conocido como bosque de pino-encino. Para mayor detalle consultar capítulos II y III de ésta tesis. Para delimitación y cuantificación de estos ecosistemas se tomaron criterios altitudinales, de 800 a 2100 msnm para sotavento y zona de transición; y de 1000 a 1500 msnm para barlovento

3.3 Definición del estado y rendimiento de los activos ecosistémicos a escala de las subcuencas estudiadas.

Para la definición del estado de los activos ecosistémicos en las subcuencas seleccionadas se determinaron los indicadores de uso generalizado, tal como la cobertura forestal de la fecha más cercana posible al año base de análisis, es decir 2008, así como la dinámica forestal y la erosión potencial.

Para la cobertura forestal actual (2007), se obtuvo basándose en el mapa realizado por Fundación Defensores de la Naturaleza (FDN, 2008) denominado “Mapa de cobertura y uso del suelo en la RBSM”. Para la obtención de la dinámica forestal se sobrepuso este

último al mapa de cobertura forestal publicado por el Instituto Nacional de Bosques (INAB, 2003) que presenta la cobertura forestal derivada de imágenes satelitales del año 2001. En tal sentido se le denomina dinámica forestal 2001-2007.

Para la obtención de los datos de erosión para cada subcuenca se emplearon los resultados de la estimación de la erosión potencial, los cuales ya fueron presentados en el Capítulo III.II. Este considera la interacción de cuatro factores en la erosión. Los factores de erosión son erodabilidad de la lluvia (Factor K), erosividad de los suelos (R), longitud y grado de pendiente (Ls) y cobertura (C). Estos cuatro factores fueron multiplicados de acuerdo a la metodología de aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE, por sus siglas en inglés) utilizando sistemas de información geográfica (para mayor información consultar capítulo III.II de esta tesis). Los primeros tres factores fueron obtenidos a partir de mapas publicados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala (MAGA, 2002) y el cuarto factor (Cobertura, C) del mapa de cobertura anteriormente descrito (para mayor información consultar Capítulo III.II de esta tesis).

Para definir el estado de la calidad de los recursos hídricos se procedió a integrar, cuando existían informes, datos del monitoreo llevado a cabo por Defensores de la Naturaleza 2006-2007. En tal sentido se reporta únicamente si son consideradas como aptas o no para consumo humano, especialmente flujos de agua después de los poblados principales (con presencia de aguas servidas) ubicados en las partes bajas de las subcuenca.

El en Cuadro 1 se presentan los indicadores y sus dimensionales de medición, así como los métodos de obtención o de cálculo y las fuentes más importantes para la obtención de información necesaria. Dicha información está ordenada de acuerdo a la estructura de la matriz de integración de resultados, la cual se abordará posteriormente.

3.4 Conformación de matriz de cuentas ambientales y económicas integradas y análisis comparativo de subcuenca de estudio.

Para el análisis integrado de la información se procedió a agrupar datos físicos y económicos de los recursos hídricos en marcos analíticos propuestos por Naciones Unidas en el marco del SCAE-Agua (Naciones Unidas, 2013; IARNA, 2009). Es importante recalcar que se organizó la información de tal manera que pudiera ser fácilmente comprensible por diversidad de actores.

Se utilizaron de referencia las matrices de activos de recursos hídricos (stock de apertura), de flujos desde el ambiente hacia el sistema económico y retornos del sistema económico al sistema ambiental, y finalmente stock de cierre). Posteriormente se elaboraron matrices de activos físicos e híbridas para integrar indicadores de eficiencia y de estado de los recursos hídricos. Los cuadros que se usaron como referentes, especialmente, son los siguientes: A1.1a, A1.1b, A1.2, A1.3, A1.4 y A1.9 (Naciones Unidas, 2013).

Esta información fue fundamental para la discusión comparativa de las subcuenca estudiadas. Finalmente se discute sobre los sitios prioritarios y necesidades de generación de información biofísica, ecohidrológica para profundizar el conocimiento respecto a las interacciones del ciclo hidrológico, los ecosistemas y los sistemas social y económico.

Cuadro 10. Indicadores, dimensión, métodos y fuentes de información del sistema de cuentas ambientales y económicas integradas en subcuencas de la RBSM.

ACTIVOS FÍSICOS		Datos específicos y fuente									
VARIABLE / CUENCA	Dimensión	San Jerónimo	Teculután	Pasabien	Pueblo Viejo						
STOCK A LA APERTURA (agua almacenada)	m ³	Comunicación personal de administrados de la RBSM y estimaciones con la fuente: De la Sierra de las Minas al valle de San Jerónimo. Acciones locales para la gestión integrada del agua. (CATIE, 2006).	No tiene reservorios de agua significativos	Agua de la represa para la hidroeléctrica (Fuente: Evaluación hidrológica de las subcuenca Pasabien y Pueblos Viejo. WWF, 2007)	No tiene reservorios de agua significativos						
AUMENTOS EN STOCK											
Disponibilidad total (Recarga + escorrentía)	m ³	Análisis de la recarga hídrica natural en cuatro subcuencas representativas de la RBSM. Capítulo III, esta tesis									
Caudal superficial anual	m ³ / s	Estudio de valoración de la producción agrícola bajo riego en cuenca San Jerónimo. FDN, 2007	Estimaciones realizadas en base datos de estación de aforo Las Minas (ver Capítulo III.III de tesis)	Fuente: Evaluación hidrológica de las subcuenca Pasabien y Pueblo Viejo. WWF, 2007							
Caudal superficial anual	m ³	Caudal subterráneo anual									
Caudal subterráneo anual	m ³	Cálculo: (Disponibilidad hídrica) - (caudal superficial estimado). Para mayor información de disponibilidad hídrica ver Capítulo III de esta tesis									
FLUJOS A LA ECONOMIA											
Uso no consuntivo											
Hidroeléctricas	m ³	Estudio: De la Sierra de las Minas al valle de San Jerónimo. Acciones locales para la gestión integrada del agua. CATIE, 2006	No aplica	Estimaciones basadas en Mercado de mayoristas de producción de energía de Guatemala. http://www.amm.org.gt	No aplica						
Uso consuntivo	m ³										
Agricultura de secano	m ³	Estimación de la ETR de cobertura de granos básicos (Mapa de Cobertura 2007, FDN). Laboratorio SIG IARNA									
Agricultura bajo riego	m ³	Estudio de valoración de la producción agrícola bajo riego en la cuenca del río San Jerónimo. FDN, 2007	Estimaciones basadas en - Determinación de la demanda actual y futura del agua para riego en la cuenca Teculután WWF, 2007. - Medios de Vida de la subcuenca Pasabien. WWF, 2008.		Medios de vida de las subcuenca Pueblo Viejo. Afirma que no hay sistemas de riego						
Hogares	m ³	Estimación de población (base de datos de censo del INE) y demanda de 300 lpd por habitante. Laboratorio SIG IARNA									
otros usos (industria)	m ³	Estudio: De la Sierra de las Minas al valle de San Jerónimo. Acciones locales para la gestión integrada del agua. CATIE, 2006	A valuation analysis of the role of the cloud forest protection. Brown et al, sf.		No aplica						
Retornos al ambiente y otros sistemas hídricos											
Agua superficial	m ³	Calculo: Caudal superficial - consuntivo									
STOCK AL CIERRE	m ³	Igual a stock de apertura		Igual a stock de apertura							

Continuación del Cuadro 1

ACTIVOS ECOSISTÉMICOS					
VARIABLE / CUENCA	Dimensión	San Jerónimo	Teculután	Pasabien	Pueblo Viejo
Ecosistemas de bosque nuboso (UMCF)	ha	Cálculo de áreas: intersección en Sistemas de Información Geográfica (SIG) de mapa hipsométrico (altitudes), de acuerdo a la deducción de ecosistemas hidrológicamente homogéneos (Capítulo II, esta tesis) con un mapa de la subcuenca respectiva.			
Ecosistemas que regulan altas intensidades de lluvia (LMCF + LMHF)	ha				
Agua filtrada (recarga hídrica)	m ³	Análisis de la recarga hídrica natural en cuatro subcuencas representativas de la RBSM. Capítulo III, ésta tesis			
INDICADORES DE SERVICIOS DE REGULACION HIDRÓLOGICA					
VARIABLE / CUENCA	Dimensión	San Jerónimo	Teculután	Pasabien	Pueblo Viejo
Producción hídrica específica	m ³ /ha/año	Cálculo: disponibilidad hídrica anual (m ³)/ superficie de la subcuenca (ha)			
Caudal superficial específico	m ³ /ha/año	Cálculo: caudal superficial total anual (m ³)/ superficie de la subcuenca (ha)			
INDICADORES DE ESTADO DE LOS SISTEMAS HÍDRICOS					
VARIABLE / CUENCA	Dimensión	San Jerónimo	Teculután	Pasabien	Pueblo Viejo
Cobertura forestal 2007	ha	Cálculo: Intersección de mapas de cobertura del suelo (FDN, 2007) y cada subcuenca			
Deforestación 2001-2007	ha	Cálculo: Intersección de mapas de cobertura del suelo (FDN, 2007), Mapa de cobertura forestal de Guatemala (INAB, 2003). SIG Iarna.			
Tasa de deforestación	% anual	Cálculo: deforestación período 2001 a 2007 / 6 (años)			
Erosión	ton/año	Erosión potencial estimada en Capítulo III de ésta tesis para cada subcuenca.			
Tasa de erosión	ton/ha/año	Cálculo: Erosión potencial anual (ton) / superficie de la subcuenca			
Capa de suelo perdido	m/año	Cálculo: Erosión potencial anual (ton) x densidad aparente representativa / superficie de la subcuenca m ²			
INDICADORES DE RENDIMIENTO MONETARIO DEL USO DEL AGUA					
VARIABLE / CUENCA	Dimensión	San Jerónimo	Teculután	Pasabien	Pueblo Viejo
Uso consuntivo per cápita	m ³ / hab.	Cálculo: Uso consuntivo de subcuenca / habitantes (bases de datos de Instituto Nacional de Estadística, INE). SIG Iarna			
Beneficio económico hidroeléctricas y uso no consuntivo	Q / m ³	Estimación del ingreso bruto anual dividido entre el volumen de agua utilizada. Fuente: Mercado de mayoristas de producción de energía de Guatemala. http://www.amm.org.gt		No aplica	
Beneficio económico agricultura con riego	Q / m ³	Estimación del ingreso bruto anual dividido entre el volumen de agua utilizada. Fuente definida arriba en consumo de agua para riego de acuerdo a cada subcuenca		Sin información	
Beneficio bruto por uso consuntivo	Q	Estudio de valoración de la producción agrícola bajo riego en la cuenca San Jerónimo. FDN, 2007	Estimaciones basadas en - Determinación de la demanda actual y futura del agua para riego en la cuenca Teculután WWF, 2007. - Medios de Vida de la subcuenca Pasabien. WWF, 2008.	Medios de vida de las subcuenca Pueblo Viejo. Afirma que no hay sistemas de riego	

4. Resultados y discusión.

4.1 Activos físicos de la cuenta ambiental y económica del agua.

A continuación se describen los principales resultados derivados del marco analítico de activos físicos de la cuenca de recursos hídricos (Cuadro 2). Todas las subcuenas evaluadas cuentan con alta disponibilidad de recursos hídricos anuales. Con caudales arriba de 2.32 m³/s. Resalta la subcuenca de Pueblo Viejo con 9.25 m³/s. La mayor parte de los recursos hídricos son superficiales. En promedio el 80% de los caudales en el punto de aforo de Teculután, Pasabien y Pueblo Viejo son superficiales. Contrastantemente San Jerónimo mostró caudales anuales subterráneos de 74 millones de m³, aproximadamente, la mitad de sus recursos disponibles.

Las únicas subcuenas que cuentan con stock inicial son las subcuenas que tienen reservorios de agua significativos, las cuales San Jerónimo y Pasabien. Dicho almacenamiento hídrico corresponde a la capacidad de las presas de captación de agua para uso en la generación hidráulica de electricidad. Este es un indicador de la alta dependencia de los poblados de la capacidad reguladora del ciclo hidrológico por parte de los ecosistemas naturales. Al mismo tiempo define a estas subcuenas como las de mayor uso no consumutivo del agua, San Jerónimo con el 65% de su caudal superficial y Pasabien con el 44%, lo cual puede considerarse alto.

Respecto al uso consumutivo destaca la agricultura bajo riego en las dos subcuenas de sotavento con el 43% de los recursos hídricos superficiales y San Jerónimo con el 21%. Respecto al uso por abastecimiento de hogares destaca Teculután con cerca del 1% del caudal superficial y las demás con valores muy bajos, inferiores al 0.5%. Como se hace evidente las cuencas que menos disponibilidad de agua presentan (en sotavento y zona de transición) son las que mayor demanda presentan. Pasabien y Teculután destacan por los volúmenes y % de caudal superficial que utilizan de forma consumativa cerca del 50% de su caudal superficial. Asimismo Pasabien y San Jerónimo usan el equivalente al 100% de sus recursos hídricos entre usos consumutivos y no consumutivos. Todo lo anterior define un uso intensivo de los recursos en los tres casos.

Por otro lado Pueblo Viejo, que es la subcuenca que naturalmente capta más agua solamente presenta el uso consumutivo importante, el cual es el de agricultura de secano con cerca del 8% de la disponibilidad hídrica. En tal sentido destaca por las exportaciones de agua o flujo del río hacia otras cuencas con 350 millones de m³ al año, excediendo entre 300% y 600% a las otras subcuenas en este rubro.

Es destacable que los registros de uso consumutivo de industrias tales como, embotelladoras, de agroquímicos, no se puede considerar completo. Esto constituye un vacío de información importante y generalizado en el desarrollo de esta investigación que es necesario contrarrestar para futuros trabajos

Cuadro 11. Marco analítico integrado de activos y flujos de los recursos hídricos en las subcuencas (año 2008)

ACTIVOS FÍSICOS									
VARIABLE / CUENCA	Dimensión	San Jerónimo	%	Tecolután	%	Pasabien	%	Pueblo Viejo	%
STOCK A LA APERTURA (agua almacenada)	m ³	13,100		0		70,000		0	
AUMENTOS EN STOCK									
Disponibilidad total	m ³	153,441,944	100	174,425,738	100	105,977,929	100	372,852,544	100
Caudal superficial anual	m ³ / s	2.5		4.9		2.32		9.25	
Caudal superficial anual	m ³	78,840,000	51	154,526,400	89	73,163,520	69	291,708,000	78
Caudal subterráneo	m ³	74,601,944	49	19,899,338	11	32,814,409	31	81,144,544	22
FLUJOS A AL ECONOMIA		Antes de punto de aforo	Después de punto de aforo	/*	Antes de punto de aforo	Después de punto de aforo	/*	Antes de punto de aforo	Después de punto de aforo
Uso no consumutivo		51,511,849	65			32,479,347	44		
Hidroeléctricas	m ³	12,048,819	39,463,030	65	n.a	32,479,347	n.a	44	n.a
Uso consumutivo	m ⁵	25,760,692	33	72,025,146	47	37,904,875	52	22,803,250	8
Agricultura de secano	m ³	8,232,813	10	3,968,438	2.6	5,221,875	7.1	22,693,750	7.8
Agricultura bajo riego	m ³	136,943	16,714,080	21	n.s 66,067,920	43	n.s 31,536,000	43	n.s n.s
Hogares	m ³	323,354	344,962	0.2	n.s 1,988,788	1.1	36,500 73,000	0.1	36,500 73,000
otros usos (industria)	m ³	n.s	8,541	0.0	n.s s.i.		n.s 1,074,000	1.5	n.s n.s
Retronos y exportaciones									
Agua superficial	m ³	53,079,308		102,400,593		68,073,050		350,049,294	
STOCK AL CIERRE	m ³	13,100		0		70,000		0	

/* Porcentaje respecto al caudal superficial anual, ns: no significativos; s.i: sin información; n.a. no aplica.

En el Cuadro 3 se muestran los indicadores de rendimiento hídrico de las subcuencas. Se muestran que la cuenca de mayor “producción” hídrica es Pueblo Viejo con 25,000 m³/ha/año. Este indicador se derivó de la disponibilidad hídrica. De acuerdo al caudal superficial se muestra un valor de cerca 20,000 m³/ha/año, es decir cada hectárea genera 20,000 m³ al año de caudal superficial verificables en el punto de aforo. Las subcuencas de sotavento y región de transición presentan rendimientos promedio de producción hídrica de 8,000 m³/ha/año.

Cuadro 12. Indicadores de rendimiento de uso de los recursos hídricos.

INDICADORES DE RENDIMIENTO HIDRICO					
VARIABLE / CUENCA	Dimensión	San Jerónimo	Teculután	Pasabien	Pueblo Viejo
Producción hídrica específica	m ³ /ha/año	6,728	8,674	10,545	25,079
Caudal superficial específico	m ³ /ha/año	3,457	7,684	7,280	19,621

En el Cuadro 4 se presentan los indicadores de rendimiento de uso de los recursos hídricos y destacan los siguientes aspectos. La subcuenca con mayor uso consumutivo per cápita de los recursos hídricos es Teculután con cerca de 7,400 m³ /habitante, aunque este dato es muy similar en Pasabien. Por otro lado el rendimiento económico más alto por m³ de agua consumido es en la actividad agrícola con Q 1.48 (US \$ 0.2) y específicamente en la subcuenca San Jerónimo.

Cuadro 13. Indicadores de rendimiento de uso de los recursos hídricos.

VARIABLE / CUENCA	Dimensión	San Jerónimo	Teculután	Pasabien	Pueblo Viejo
Uso consumutivo per cápita	m ³ / hab.	1,854	7,484	7,046	3,724
Beneficio económico hidroeléctricas	Q / m ³	0.95	n.a	0.92	No aplica
Beneficio económico agricultura con riego	Q / m ³	1.51	1.48	1.37	?
Beneficio bruto por uso no consumutivo	Q	49,080,000	No aplica	32,634,708	No aplica
Beneficio bruto por uso consumutivo	Q	31,439,636	97,978,285	48,345,925	?

Los beneficios brutos más altos se evidenciaron para Teculután, con cerca de Q 100 millones, o US\$ 12 millones. Es importante destacar que la generación de electricidad significa ingresos en Pasabien y San Jerónimo de entre Q 32 y 49 millones solamente para un usuario del agua, con un rendimiento cercano al US\$ 0.15 / m³

Posterior al análisis de los activos físicos, sus flujos a la economía y rendimiento económico se procedió a analizar los activos ecosistémicos (Cuadro 5). A continuación se describen los principales hallazgos.

Cuadro 14. Marco analítico de activos ecosistémicos.

ACTIVOS ECOSISTÉMICOS										
VARIABLE / CUENCA	Dimensión	San Jerónimo	%	Teculután	%	Pasabien	%	Pueblo Viejo	%	
Extensión	ha	22,805	100	20,109	100	10,050	100	14,867	100	
Ecosistema bosque nuboso (UMCF)	ha	3,193	14	3,016	15	1,608	16	7,285	49	
Lámina promedio recarga de ecosistema UMCF	mm	950		1,300		1,900		3,000		
Volumen recarga UMFC	millones m ³	30		39		31		219		
% de la recarga total en UMFC	%	23		32		36		67		
Ecosistemas (LMCF y LMHF) reguladores de crecidas y erosión	ha	12,315	54	13,875	69	6,834	68	4,311	29	
Agua filtrada (recarga hídrica) total anual en subcuenca	millones m ³	131		123		86		328		

El Bosque nuboso (UMCF) presenta diferentes láminas de recarga, de acuerdo a la región hidrológica, desde 950 mm en San Jerónimo hasta 3000 en Pueblo Viejo. Las proporciones de superficie a nivel de subcuenca van desde un promedio de 15% en sotavento y la zona de transición hasta casi un 50% en Pueblo Viejo. El volumen de recarga va desde 30 millones de m³ en San Jerónimo hasta 219 millones en Pueblo Viejo.

En sotavento la superficie de este ecosistema es de aproximadamente el 15% de la subcuenca y representa un poco más del 30% de la recarga hídrica de la misma. Asimismo se puede inferir que las subcuencas de sotavento y San Jerónimo son las regiones más propensas a la ocurrencia de caudales mínimos extremos, debido a que tienen la menor proporción en % de superficie de bosque nuboso.

Como referencia del significado de esta recarga se puede mencionar que en el caso de Pueblo viejo éste volumen excede con creces el uso consuntivo. En el caso de San Jerónimo y Pasabien la recarga es similar al rubro de uso consuntivo en la subcuencas. Sin embargo, en la primera es ligeramente mayor y en Pasabien se estima un déficit del 20%. El caso más extremo se presenta en Teculután, en la que se demanda para uso consuntivo 72 millones de m³ y éste ecosistema recarga únicamente 39 millones de m³, es decir un déficit del 45%.

Respecto a los ecosistemas que se relacionan con la regulación de caudales máximos y erosión (LMCF y LMHF) no se pudo cuantificar el papel en este servicio ecosistémico a nivel de las subcuencas evaluadas. Sin embargo, aunque no sea su mayor aporte, se evidencia también su importancia relativa en la recarga de las cuencas de sotavento

al constatar que por su extensión juegan un papel importante en términos de volumetría total (Cuadro 5).

A continuación se describe el estado de los activos ecosistémicos y recursos hídricos a escala de subcuenca (Cuadro 6).

Cuadro 15. Indicadores de estado de ecosistemas y recursos hídricos.

INDICADORES DE ESTADO DE LOS ECOSISTEMAS Y RECURSOS HÍDRICOS A ESCALA DE SUBCUENCA									
VARIABLE / CUENCA	Dimensión	San Jerónimo	%	Teculután	%	Pasabien	%	Pueblo Viejo	%
Cobertura forestal 2007	ha	12,501	55	11,273	56	4243	42	10,039	68
Deforestación 2001-2007	ha	2,392	19	-528.05	-5	-384.28	-9	1,083	11
Tasa de deforestación	% anual	3.2						1.8	
Erosión	ton/año	158,733		98,216		80,621		224,804	
Tasa de erosión	ton/ha/año	7.0		4.9		8.0		15.1	
Capa de suelo perdido	m/año	0.08		0.05		0.1		0.22	
Calidad agua en punto de aforo	Consumo			Apta		Apta			
Calidad agua en punto de exportación	Consumo			No apta		No apta			

Respecto a los indicadores de estado destaca que las subcuencas presentan una cobertura forestal mayor al 40%. En los extremos se ubican Pasabien con 42% de cobertura forestal y Pueblo Viejo son 68%. Las subcuencas de sotavento presentan tasas negativas de deforestación, es decir, una dinámica favorable para la recuperación de los servicios ecosistémicos. Teculután presenta la tasa más baja de erosión potencial cerca de 5 Ton/ha/año. Contrastantemente a lo anterior la subcuenca San Jerónimo presenta la tasa de deforestación más alta y datos muy elevados de erosión potencial (7 ton/ha/año).

Pueblo Viejo evidenció una deforestación anual mayor al 1%, lo cual puede considerarse muy alto. Además se determinó una erosión potencial de 15 Ton/ha/año (equivalente a 225 toneladas de suelos erosionadas), siendo la más alta de las subcuencas evaluadas. Este es un indicador de la alta susceptibilidad de estos suelos a la pérdida de la capacidad productiva. Estas tasas tan elevadas obedecen al régimen hídrico de altas intensidades de precipitación y a las altas pendientes que presenta esta subcuenca en la parte media y parte alta. Esta es la subcuenca que mayor productividad hídrica ofrece, sin embargo puede estimarse que es la que menores ingresos brutos ofrece y menos porcentaje de uso consuntivo y no consuntivo presenta.

Respecto a la calidad del agua reportada únicamente para las subcuencas de Teculután y Pasabien, presentan la misma tendencia, apta antes de ingresar a los poblados importantes, donde reciben aguas servidas, y posteriormente son exportadas a otras cuencas y ecosistemas ya siendo no aptas para consumo humano. Esto es un indicador muy claro de la presión ejercida sobre los recursos hídricos así como de la degradación e insostenibilidad.

5. Conclusiones y consideraciones finales.

La integración de marcos analíticos de contabilidad ambiental y económica fortalecidos con principios e información ecohidrológica, demostró ser muy útil para evidenciar la importancia superlativa de la RBSM y al mismo tiempo analizar de una manera balanceada y objetiva, el servicio ecosistémico de regulación hidrológica en cuatro subcuencas ubicadas en condiciones contrastantes en la RBSM.

En todos las subcuencas se considera que existe una buena disponibilidad de recursos físicos de acuerdo a la población y actividades económicas.

Se logró evidenciar la importancia socioeconómica que representan los ecosistemas de bosque nuboso (UMCF) por los servicios ecosistémicos de recarga hídrica y regulación de caudales mínimos. Las mayores necesidades de conservación y restauración de estos ecosistemas se presentan en las regiones hidrológicas de sotavento y de transición entre sotavento y barlovento (subcuenca San Jerónimo).

Lo anterior se basa, principalmente, en su escasa cobertura superficial (alrededor de 15%), alta dependencia de estos ecosistemas para regular caudales para riego (que utiliza entre 21 y 43 % de su caudal superficial), con especial sensibilidad en estación seca, así como muy altas demandas de recursos hídricos superficiales (cercaas al 50% para uso consuntivo), y muy alta degradación en la calidad de los recursos hídricos.

Destaca la subcuenca Tecolután por presentar el mayor uso consuntivo del agua (la mayor demanda), tanto bruta como per cápita, mayor rendimiento monetario por el uso consuntivo del agua. Al mismo tiempo presentó la más alta sensibilidad por tener la menor proporción de cobertura de ecosistemas con potencial de regulación de caudales de estiaje. Así mismo se evidenció impactos severos en la calidad del agua por parte del sistema socioeconómico.

Asimismo Pasabien y San Jerónimo destacan por presentar muy altas proporciones de uso consuntivo y no consuntivo, sumando ambos alrededor del 100 % de su caudal superficial y menor cobertura relativa de bosque nuboso.

Todas las subcuencas presentan indicadores de estado regular. San Jerónimo y Pueblo Viejo presentan las más altas tasas de erosión y deforestación. De acuerdo al análisis cartográfico realizado dichas subcuencas evidenciaron recuperación de sus ecosistemas forestales.

Se evidenció alta dependencia y productividad del sector económico basado en el uso del agua con ingresos brutos de entre Q 80 y 100 millones (aproximadamente Q US\$ 10,000). Para garantizar estos estos beneficios y dinámica económica es necesario fortalecer la gestión, especialmente de los ecosistemas de bosque nuboso (UMCF) y, complementariamente, del bosque de pino encino.

Se evidenciaron vacíos de información importantes, entre los que destacaron, información biofísica y de uso del agua subterránea, información detallada y análisis de caudales a lo largo del años (momentos críticos en estación más y lluviosa) y de ecohidrología de los ecosistemas definidos. Esta información se considera importante para definir indicadores biofísicos relacionados con la regulación hidrológica. Además

se constató la carencia de información de activos monetarios y flujos dentro de la economía relacionados con el uso del agua, por ejemplo, cadenas de suministro y consumo intermedio y la generación de empleo. Para futuros análisis de las subcuencas estudiadas como para la implementación de un sistema de cuentas ambientales y económicas para la RBSM será importante generar esta información.

6. Bibliografía principal

1. Bennett, M., Bouma, J., & Wolters, T. (2002). *Environmental management accounting: Informational and institutional developments*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic publisher.
2. Boyd, J., & Banzhaf, S. (2007). Wat are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 1-11.
3. Brown, M., & De la Roca, I. (1996). *A valuation analysis of the role of cloud forest in watershed protection*. Guatemala: RARE.
4. Bruijnzeel , L., & Proctor, W. (1995). Hydrology and Biochemistry of tropical montane cloud forest: what do we really know? En L. Hamilton, J. Juvick , & F. Hamilton, *Tropical montane cloud forest* (págs. 38-78). New York: Springer-Verlag.
5. Bruijnzeel. (1990). *Hydrology of moist tropical forest effects of conversion. A State of knowledge review*. . Amsterdam: UNESCO, International Hydrological Programme.
6. Bruijnzeel, L., Kappelle, M., Mulligan, M., & Scatena, F. (2010). Tropical montane cloud forests: state of knowledge and sustainability perspectives in a changing world. En L. Bruijnzeel, F. Scatena, & L. Hamilton, *Tropical Montane Cloud Forests. Science for conservation and management* (pág. 740). New York: Cambridge Press.
7. Bruijnzeel, S. (1999). Hydrology of Tropical Montane Cloud Forest: a reassessment. En I. H. Programme, *Second International Colloquium on Hydrology and Water Management in the Humid Tropics* (pág. 27). Panama: UNESCO.
8. Bruijnzeel, S. (2008). Demonstrating hydrological benefits from tropical reforestation efforts. (pág. 31). Amsterdam: Vrije Universitet.
9. CEPAL. (2004). La distribución espacial de la pobreza en relación a los sistemas ambientales en América Latina. *Serie medio ambiente y desarrollo*. Santiago, Chile: CEPAL.
10. Daubenmire, D. (1988). *Ecología Vegetal. Tratado de autoecología de plantas*. México, D.F.: Limusa.
11. De la Cruz, R. (1972). *Mapa de zonas de vida de Guatemala*. Guatemala: INAFOR.
12. Deepak, R. (2006). Dry season clouds and rainfall in northern Central America: Implication on mesoamerican biological corridor. *Global and planetary change*, 54 (2006) 150–162.
13. Defensores de la Naturaleza. (2004). *Programa de investigación de recursos hídricos de la Reserva de la biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Defensores de la Naturaleza.

14. Dengo, G. (1968). *Estructura geológica, historia tectónica y morfología de América Central*. Guatemala : Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial.
15. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2013). *Documento exploratorio de la subcuenca te ecosistemas*. Bogotá: Contraloría general de la República de Colombia.
16. Dinerstein, E. O. (1995). *A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean*. Washington D.C.: The World Bank and WWF.
17. Dix, M. (1993). *Sierra de las Minas Biosphere Reserve* . Washington: Smithsonian Institute.
18. Dix, M. A. (1997). Centres of Plant Diversity: A Guide and Strategy for Their Conservation. Volume 3: The Americas. En S. H.-M.-L. Davis, *Centres of Plant Diversity: A Guide and Strategy for Their Conservation. Volume 3: The Americas*. Cambridge, England: IUCN Publication Unit.
19. EEA. (2006). *Land accounts for Europe (1990-2000). Towards integrated land and ecosystem account*. Copenhagen: EEA.
20. Estrada. (1999). *Distribución altitudinal de las comunidades forestales en la parte media de la subcuenca Río Raxón Tzunum (1200-2200 msnm)*, Reserva de biosfera Sierra de las Minas. . Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.
21. European Comission, United Nations and World Bank. (2013). *System of environmental-economic accounting 2012. Experimental ecosystem accounting*. s.i.: United Nations.
22. FAO. (1992). *Manual de campo para la ordenación de subcuencas hidrográficas. Guía FAO Conservación*. México: FAO.
23. FIPA/AID. (2002). *Estudio de valoración económica del servicio ambiental de regulación hídrica del lado sur de la Reserva de la Biósfera Sierra de las Minas*. Guatemala : FIPA/AID.
24. Foster, P. (2001). The potential negative impacts of global climate change on. *Earth sciences reviews*, 55 (2001) 73–106.
25. Frumau, K., Bruijnzeel, L., & Tobon, C. (2006). *Hydrological measurement protocol for montane cloud forest. Annex 2, Final Technical Report DFID-FRP Project R7991*. Amsterdam: Vrije Universiteit.
26. Fundación Defensores de la Naturaleza. (2003). *III Plan Maestro 2003-2008 de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Fundación Defensores de la Naturaleza.
27. Fundación Defensores de la Naturaleza. (2004). *Valoración de la producción agrícola bajo riego en la subcuenca San Jerónimo*. Guatemala: FDN.

28. Fundación Defensores de la Naturaleza. (2010). *IV Actualización del Plan Maestro de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: FDN.
29. García, G. (2007). *An ecohydrological and soils study in a montane cloud forest in the National Park of Garajonay, La Gomera (Canary Island, Spain)*. Amsterdam : Vrije Universiteit.
30. Gonzales, O. (1999). *Estudio cualitativo de la composición forestal remanente entre 400 y 1200 msnm, de la subcuenca Río Raxón, Tzunum, Reserva de biosfera Sierra de las Minas, Panzos, Alta Verapaz*. Guatemala: universidad del Valle.
31. Guerra, A. A. (2010). *Climate-related disaster risk in the mountain areas: the Guatemalan highlands at stat of the 21st century*. Oxford: university of Oxford.
32. Haines-Young, R. (2000). Sustainable developement and sustainable landscapes: defning a new paradigm for Landscapes Ecology. *Fennia*, 178(1) 4-7.
33. Herrera, I. (1995). *Manual de Hidrología*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
34. Holdridge, L. (1971). *Ecología basada en zonas de vida*. Turrialba: IICA.
35. IARNA. (2009). *Sistema Cuentas Ambientales y Económicas Integrado. Cuentas Integrada de Tierras y Ecosistemas*. Guatemala: IARNA.
36. IARNA/URL-IIA. (2006). *Análisis de coyuntura ambiental*. Guatemala, Guatemala: Instituto de Agricultural Recusross Naturales y Ambiente.
37. IARNA/URL-IIA. (2006). *Perfil ambiental de Guatemala, tendencias y reflexiones sobre la gestión ambiental*. Guatemala: IARNA.
38. Janauer, G. (2000). Ecohydrology: fusing concepts and scales. *Ecological engineering*, 9-16.
39. Kappelle, M., & Brown, A. (2000). *Bosques nublados del neotrópico*. San José, Costa Rica: INBIO.
40. Kimaro, D., Poesen, J., Msanya, B., & Deckers, J. (2008). Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interril and Ril erosion. *Catena*, 75 38–44.
41. Linsley, J. (1998). *Hidrología para ingenieros*. Distrito federal, Mexico: McGaraw-Hill.
42. Linsley, R. J. (1988). *Hidrología para ingenieros*. México: Mc Graw Hill.
43. Loening, L., & Markussen, M. (2003). *Pobreza, Deforestación y Pérdida de la biodiversidad en Guatemala*. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen.
44. Machorro, S. (2010). *Estudio hidrogeológico de las subcuenca Pasabien y Pueblo Viejo*. . Guatemala : World Wildlife Fund.

45. MAGA. (2002). *Mapa de erosión potencial de Guatemala*. Guatemala: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación .
46. Marcos, C. (1999). *Censo de Especies del género Quercus y su distribución geográfica en dos subcuenca de la reserva de la biosfera Sierra de las Minas*. Guatemala: Universidad del Valle.
47. Martin, E. M. (2003). *Local Knowledge of Biodiversity and Water Conservation within Multi-Strata Coffee Agroforestry Systems, River Hato Watershed, El Progreso Department, Guatemala*. University of Wales, Forestry . Wales: Forestry of University of Wales.
48. Martinez, N. y. (1998). *Hidrología Forestal*. Valladaolid: Universidad de Valladolid.
49. Mathewson, K. (2004). A century and counting: Geographical research on Guatemala a historical perspective. (L. S. Department of Geography and Anthropology, Ed.) *Geoforum*.
50. Matucci , S., & Colma , S. (1982). *Estudio de la vegetación* . Mexico : OEA.
51. Medinilla, O. E. (1999). *Estudio florístico de la comunidad de pino encino de la subcuenca Río Colorado, Zacapa*. . Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
52. Mendez, C., & Coronado, E. (1993). *Evaluación Ecológica Rápida de la Reserva de la Biósfera "Sierra de las Minas"* . Guatemala: Centro de Estudios Conservacionistas de la Universidad de San Carlos de Guatemala (CECON).
53. Monslave, G. (2008). *hidrología en la ingeniería*. Bogotá: Escuela colombiana de ingeniería.
54. Naciones Unidas. (2013). *Sistema de contabilidad ambiental y económica para el agua*. New York: Naciones Unidas.
55. Nuñez, O. (2005). *Fondo del agua Sistema Motagua-Polochic*. Guatemala: Defensores de la naturaleza.
56. OMM, Organización meteorológica Mundial . (1994). *Guía de prácticas hidrológicas*. Washington: Organización Meteorológica Mundial.
57. Postel, S., & Thomphson, B. (2005). Watershed protection: Capturing the benefits of nature's water supply services. *Ecological Forum*, 95-108.
58. Potschin, M. H.-Y. (2005). Rio +10 sustainability science and Landscapes Ecology. *Landscape and urban planning*, 162-174.
59. Rachchh, M., & Siddheshwar, G. (2014). The frameworks of environmental accounting. *International Journal of Engineering and Mangement Sciences* , 160-162.
60. Rosito, J. C. (1999). *Estudio florístico, edáfico y geológico de la comunidad del cipresillo (Taxus globosa Schlecht.) en los cerros Pinalón, Guaxabajá y Mulujá*

de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

61. Rosito, J. C. (2010). *Monitoreo hidrológico en la subcuenca Tecolután / proyecto PESH.* Guatemala: WWF-CARE/IARNA.
62. Sandoval, I. (1989). *Principios de riego y drenaje.* Guatemala: Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.
63. Standley, P., & Steyermark, J. (1964). *flora of Guatemala.* Chicago: Natural museum Fieldiana Botany .
64. Succhini, A. (2002). *Endemismo florístico en el norte de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas.* Guatemala: Centro de Estudios Conservacionistas de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
65. Thornthwaite, C. (1931). The climate of North America, according with a new classification. *Geographical Review,* 633-655.
66. Tobón, C. (2009). *Protocolo de mediciones hidrologicas, de erosión y biológicas en la subcuenca del río Jequetepeque,* Perú. Bogotá: Universidad nacional de Colombia.
67. Toledo, E. (1997). *Fitodistribución de epífitas del género Tillandsia L. (Bromeliaceae: Tillandsioideae) en la Subcuenca del Río Jones, Sierra de las Minas.* Guatemala: Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
68. United Nations. (2003). *Integrated Environmental and Economic Accounting, 2003.* New York: United Nations.
69. United Nations. (2004). *Millennium Ecosystem Assessment.* Unaited Nations.
70. Van Dijk, A. (2003). *Ecohydrology. Course Reader.* Amsterdam: Vrije Universitet.
71. Vargas, J. M. (2001). *Caracterización de la comunidad de helechos arborecentes en la subcuenca del río Naranjo.* Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.
72. Veliz, M. E., Cobar, A. J., Ramírez, F. J., & García, M. J. (2003). *La diversidad florística del Monte Espinoso de Guatemala .* Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, DIGI, Proyecto DIGUSAC 2.55 58 p.
73. Vora, R. (1994). *Recommendations on management of Sierra de las Minas Biosphere reserve, Guatemala.* Guatemala: Defensores de la Naturaleza.
74. Weber, J.-L. (2007). Implementation of land and ecosystem accounts at the European Environment Agency. *Ecological Economics,* 696-707.
75. WWF. (2007). *Criterios para la priorización y selección de subcuenca.* Guatemala : World Wildlife Fund Inc.

76. WWF. (2009). *Determinación de la demanda actual y futura de agua para riego en la subcuenca Tecolután*. Guatemala : World Wildlife Fund Inc.
77. WWF. (2009). *Valoración económica de los servicios hidrológicos en la subcuenca Tecolután. Proyecto: Compensación equitativa por servicios hidrológicos*. . Guatemala : Comunicaciones WWF Centroamérica .
78. Zalewski, M. (2000). Ecohydrology — the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. 1(16).

CAPÍTULO V

**Clasificación de unidades territoriales de gestión hídrica (microcuenca)
mediante un análisis sistemico de los servicios de regulación
hidrológica en Guatemala.**

Contenido

Resumen	252	
1	Introducción	253
2	Objetivos	259
2.1	Objetivo general.....	259
2.2	Objetivos específicos.....	259
3	Metodología.	260
3.1	Categorización y priorización de microcuencas de acuerdo a sus atributos de captación y regulación hidrológica.	260
3.2	Definición de directrices generales de conservación o restauración.	267
4	Resultados y discusión.	269
4.1	Hidrología general de Guatemala	269
4.1.1	<i>Oferta hídrica natural</i>	269
4.1.2	<i>Demanda de recursos hídricos</i>	270
4.1.3	<i>Ciclo hidrológico y cambio climático</i>	271
4.2	Identificación de sitios críticos para la captación y regulación hidrológica en Guatemala a escala de microcuencas.	271
4.2.1	<i>Componente 1. Captación y regulación hidrológica del ciclo largo (anual).</i>	275
4.2.2	<i>Componente 2. Regulación del flujo hídrico instantáneo.</i>	279
4.2.3	<i>Componente 3. Impacto socioambiental (servicios ecosistémicos y gestión de riesgo).</i>	284
4.2.4	<i>Componente 4. Gestión ambiental relacionada con la conservación y almacenamiento de agua.</i>	289
4.2.5	<i>Componente 5. Estado de los factores modificadores del flujo hídrico.</i> 293	
4.3	Categorización de microcuencas de acuerdo a la obtención del índice de captación y regulación hidrológica ICRH.....	297
4.4	Determinación de directrices generales para la implementación de actividades de conservación o restauración de microcuencas priorizadas.....	301
4.5	Impactos esperados de la gestión adecuada de las microcuencas priorizadas	305
4.6	Impacto del cambio climático.....	306
5	Conclusiones	312
6	Recomendaciones	313
7	Bibliografía	314
8	Anexos	320

Índice de Figuras

Figura 1. Ciclo hidrológico, ciclos cortos y ciclos largos.....	254
Figura 2. Esquema de análisis sistémico del ciclo hidrológico.....	257
Figura 3. Definición de indicadores para priorización de microcuencas de acuerdo a un marco conceptual sistémico.....	262
Figura 4. Árbol de decisión para la determinación de acciones prioritarias de conservación o restauración en microcuencas	268
Figura 5. Vertientes y cuencas de Guatemala.....	273
Figura 6. Vertientes y cuencas de Guatemala.....	274
Figura 7. Mapa de pendientes y relieve de Guatemala.....	275
Figura 8. Integración de indicadores del Componente 1 para la integración del ICRH a escala de microcuenca.....	276
Figura 9. Indicador 1.1. Balance hídrico atmosférico (relación evapotranspiración potencial / precipitación) a escala de microcuenca.....	277
Figura 10. Indicador 1.2. Recarga hídrica profunda (mm/año) a escala de cuenca.....	278
Figura 11. Integración de indicadores del Componente 2 para la integración del ICRH a escala de microcuenca	279
Figura 12. Indicador 2.1. Erodabilidad de los suelos (factor K) promedio a escala de microcuenca.....	280
Figura 13. Indicador 2.2. Erosividad de la lluvia (factor R) promedio a escala de microcuenca.....	281
Figura 14. Indicador 2.3. Pendiente – longitud del terreno (factor Ls) promedio a escala de microcuenca.....	282
Figura 15. Indicador 2.4. Porcentaje de superficie en posición fisiográfica de regulación hídrica (parte alta de cuenca).....	283
Figura 16. Integración de indicadores del Componente 3 para la integración del ICRH a escala de microcuenca	284
Figura 17. Indicador 3.1. Población expuesta a inundaciones a escala de cuenca.....	285
Figura 18. Indicador 3.2. . Población expuesta a sequías a escala de cuenca.....	286
Figura 19. Indicador 3.3. . Población expuesta a deslizamientos a escala de cuenca.....	287
Figura 20. Indicador 3.4. Demanda de agua (millones de m ³) a escala de cuenca.....	288
Figura 21. Indicador 3.5. Porcentaje de cobertura de cuerpos de agua naturales a escala de cuenca.....	289
Figura 22. Integración de indicadores del Componente 4 para la integración del ICRH a escala de microcuenca	290
Figura 23. Indicador 4.1. Gasto municipal per cápita para conservación a escala de microcuenca.....	291
Figura 24. Indicador 4.2. Porcentaje de cobertura de áreas protegidas a escala de microcuenca.....	292
Figura 25. Indicador 4.3. Existencia de obras para almacenamiento de agua (capacidad instalada en MW) a escala de cuenca.....	293
Figura 26. Integración de indicadores del Componente 5 para la integración del ICRH a escala de microcuenca	294
Figura 27. Indicador 5.1. Cobertura forestal a escala de microcuencas.....	295
Figura 28. Indicador 5.2. Cobertura con bosques densos a escala de microcuenca.....	296
Figura 29. Indicador 5.3. Conflictos de uso suelo a escala de microcuenca.....	297
Figura 30. Visualización gráfica para la categorización de las microcuencas, de acuerdo al ICRH.....	298
Figura 31. Distribución geográfica de las cinco categorías de priorización de microcuencas de Guatemala de acuerdo al uso del ICRH.....	300
Figura 32. Distribución geográfica de las cinco categorías de priorización de microcuencas de Guatemala.....	309
Figura 33. Efecto del cambio climático en las captación hídrica en las categorías de microcuencas priorizadas (Escenario A2).	310

Figura 34. Efecto del cambio climático en las categorías de microcuencas priorizadas (Escenario A2).....	311
---	-----

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Descripción de los componentes 1, 2 y 3 para la obtención del ICRH.....	263
Cuadro 2. Descripción de los componentes 4 y 5 para la obtención del ICRH.....	263
Cuadro 3. Matriz para la valoración de microcuencas, componentes 1, 2 y 3 del ICRH.....	265
Cuadro 4. Distribución del uso del agua en Guatemala por las principales actividades económicas y de consumo (período 2006-2010).	270
Cuadro 5. Datos generales de las microcuencas de Guatemala.	272
Cuadro 6. Lista de cuencas y vertientes de Guatemala.	272
Cuadro 7. Resultados generales de la categorización de las microcuencas de Guatemala. 299	
Cuadro 8. Determinación de factibilidad de conservación/restauración de las microcuencas priorizadas.	302
Cuadro 9. Resumen de indicadores y componentes para la generación del ICRH, de acuerdo a las vertientes hidrográficas y agrupación de categorías.	308
Cuadro 10. Disponibilidad hídrica de acuerdo a las Categorías de priorización de microcuencas de Guatemala.....	309

Resumen

En el capítulo V se presenta el estudio denominado: **Categorización de unidades territoriales (microcuencas) para la gestión de servicios ecosistémicos de captación y regulación hidrológica en Guatemala**. Este desarrolla inicialmente los fundamentos conceptuales con un enfoque sistémico del ciclo del agua haciendo énfasis en la comprensión de los servicios ecosistémicos vinculados a la regulación hidrológica.

Posteriormente se describe el marco legal e institucional así como la problemática relacionada con la gestión de los recursos hídricos en Guatemala. Se evidenció una grave crisis respecto a la carencia de un sistema institucional adecuado para garantizar el aprovisionamiento de agua tanto para la sociedad como para los ecosistemas. Asimismo se determinó un acelerado deterioro, insostenibilidad, alta conflictividad y riesgo vinculados a los recursos hídricos. En tal sentido se plantea la necesidad de delimitar territorios para la gestión de recursos hídricos en Guatemala. Estos territorios, enmarcadas en el contexto legal e institucional actual, se definieron como aquellas microcuencas críticas por su papel en la captación y regulación hidrológica.

Para la categorización de estas tierras se recopiló la información geográfica e hidrológica disponible en nuestro medio, integrando aquella que puede considerarse como confiable. Asimismo se desarrolló un índice de captación y regulación hidrológica (ICRH), el cual fue aplicado a las más de 2391 microcuencas definidas cartográficamente para el territorio guatemalteco. Este índice se basa en la aplicación de un marco conceptual sistémico (interacción de elementos y subsistemas de la naturaleza y la sociedad) en el que se definen cinco componentes principales que, de forma balanceada (similar importancia), participan en la regulación del ciclo hidrológico. Estos componentes son: a) captación y regulación de ciclo largo (anual o mayor); b) regulación del flujo instantáneo; c) importancia e impacto en el sistema socioeconómico (provisión de servicios ecosistémicos hidrológicos) d) gestión de recursos naturales por parte de actores locales; y, e) estado de los recursos naturales, o amenazas, asociadas a la captación y regulación hidrológica, tal como el bosque/deforestación, estado del bosque (densidad forestal) y conflictos de uso del suelo.

El análisis se llevó a cabo de tal manera que, de una forma objetiva, lógica, balanceada y controlada, es decir comprensible, se lograra clasificar y priorizar las microcuencas críticas para su gestión, de acuerdo a sus propiedades hidrológicas e interacciones con la sociedad. En tal sentido se priorizaron cerca de 500 microcuencas que cubren el 16% del territorio nacional (cerca de 1,700,000 ha) en donde se capta y regula el 26% de la lluvia neta. Asimismo se analizó la factibilidad de intervención para implementar acciones de conservación.

Además se analizó la pertinencia y efectividad de la implementación del ICRH a escala de microcuenca mediante la determinación del impacto biofísico y socioeconómico derivado de la conservación de las mismas. Se determinó que las microcuencas priorizadas son fundamentales para garantizar el aprovisionamiento de agua tanto para su uso consuntivo como no consuntivo para una gran proporción de la población guatemalteca, así como estratégicas para lograr objetivos de conservación y la gestión de riesgo hidro-climático.

Basado en todo lo anterior se definieron directrices generales de intervención, mediante el análisis del estado de las microcuencas priorizadas. Asimismo se analiza el impacto que se lograría con la gestión adecuada de las microcuencas priorizadas.

1. Introducción

En los países de la región centroamericana la restricción proyectada en el suministro de agua potable podría resultar en el desastre natural más devastador que la historia haya podido registrar, a menos que se haga algo para impedirlo (Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América , 2000) (CATIE, 2009)

De acuerdo al Organización Mundial de Meteorología (WMO, por sus siglas en inglés) la escasez y el uso excesivo del agua dulce plantea una creciente y seria amenaza para el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente. La salud y el bienestar humanos, la seguridad alimentaria, el desarrollo industrial y los ecosistemas de que dependen se estarán en peligro, a no ser que la gestión de los recursos hídricos y el manejo de los suelos se realicen en el presente decenio y aún más adelante de forma más eficaz que hasta ahora (WMO, 2006).

La lluvia en las zonas de recarga de los acuíferos son la principal y más importante fuente de abastecimiento de agua para los diferentes cursos, manantiales y cuerpos de agua subterráneos. Sin embargo, muchas de las prácticas en actividades como la agricultura, la ganadería, la producción forestal, el desarrollo urbanístico o la industria alteran las características de las zonas de recarga hídrica y dificultan la infiltración del agua al erosionar, compactar, impermeabilizar y dejar descubierto el suelo, lo cual genera una mayor escorrentía superficial y disminuye la recarga de los acuíferos. En términos generales se reduce significativamente el nivel de las aguas subterráneas (acuíferos) y se afecta la calidad de las aguas, que con frecuencia se vuelven inadecuadas para el consumo humano (CATIE, 2009).

La provisión efectiva de agua para las presentes y futuras generaciones, así como a los diferentes procesos productivos requiere, en Guatemala, una gestión integrada que se base en, al menos, los siguientes aspectos:

- a) Condiciones ambientales mínimas para el mantenimiento del ciclo hidrológico (especialmente las que se refieren a cobertura boscosa en zonas de mayor importancia hidrológica).
- b) Mayor eficiencia en el uso de los recursos hídricos, ya sea como bien de consumo, factor de producción o receptor de deshechos.
- c) Instrumentos institucionales y normativos que garanticen una efectiva gobernabilidad del agua y una participación amplia y responsable de toda la sociedad en la amplia variedad de procesos de gestión (IARNA-URL, 2012).

Basado en lo anterior se destaca la importancia de realizar el presente estudio, denominado: **Categorización de unidades territoriales (microcuencas) de gestión de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en Guatemala**. El principal alcance de este estudio es generar información hidrológica que fundamenten el desarrollo de instrumentos de política para conservar y restaurar los ecosistemas críticos para la regulación del ciclo hidrológico en Guatemala.

Una de las principales herramientas para el análisis, planificación y gestión adecuada del agua es la hidrología. Esta ciencia trata la presencia y distribución espacial y temporal del agua en la Tierra, tanto por encima como por debajo de su superficie; y en particular, de sus propiedades químicas, biológicas y físicas así como de su interacción con el entorno físico. La hidrología parte de la comprensión de las distintas fases del ciclo hidrológico, desde el paso del agua de la atmósfera a la Tierra hasta su regreso a la atmósfera (Figura 1). Este conocimiento constituye, pues, la base de la evaluación y gestión de los recursos hídricos y de los problemas prácticos ocasionados por las crecidas y sequías, la erosión y el transporte de sedimentos y la polución del agua (WMO, 2006).

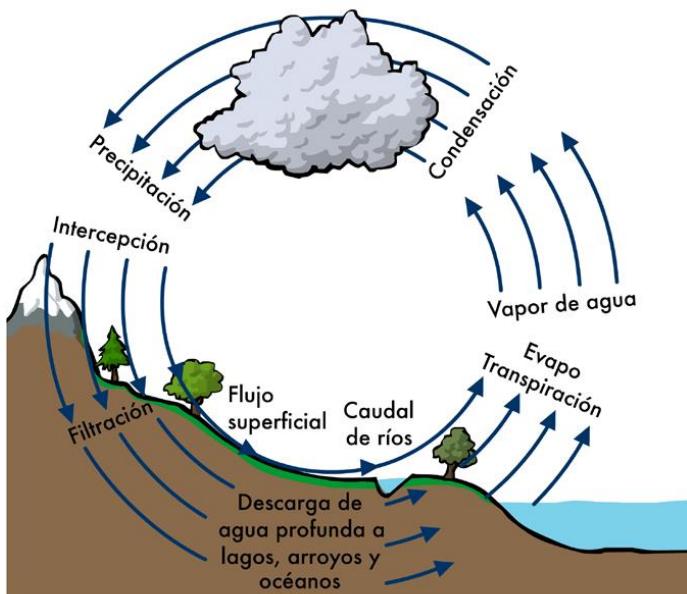


Figura 40. Ciclo hidrológico, ciclos cortos y ciclos largos.

Servicios ecosistémicos relacionados con la regulación del ciclo hidrológico.

Es de amplio reconocimiento que los ecosistemas proporcionan a los humanos numerosos beneficios, tales como agua potable, medicamentos, alimentos y oportunidades de recreación. La Evaluación de Ecosistemas del Milenio (Millennium Ecosystem Assessment, 2005.) realzó la importancia de estos servicios de los ecosistemas para sostener el bienestar humano. En tal sentido se ha desarrollado, principalmente, tres líneas de aplicación del concepto de los servicios ecosistémicos, a saber: a) la de economía y valoración de los ecosistemas y la biodiversidad (Oudenhoven, Petza, Alkemadeb, Heina, & de Groot, 2012), b) asignación óptima y gestión de las diferentes opciones de uso del suelo (de Groot R. , Alkemade, Braat , Hein, & Willemen, 2010), y c) hacer operativo el concepto de servicios ecosistémicos, en esquemas de pago por servicios ambientales, partiendo del conocimiento adquirido en las últimas décadas (Burkharda, de Groot, Constanza, Seppelt, Jorensen, & Potschin, 2012).

El enfoque de trabajo y diversas aplicaciones del concepto de servicios ecosistémicos, especialmente los vinculados con la función de regulación hidrológica, han ganado importancia no solo a nivel académico, sino también político y con ejemplos de aplicaciones en campo a diversas escalas (de Groot R. , Alkemade, Braat , Hein, & Willemen, 2010; Braat & Groot, 2012).

El servicio ecosistémico, por definición, es un proceso o bien natural que contribuye al bienestar del ser humano. El beneficio o servicio se traduce en el bienestar socio-cultural o ganancia económica proporcionada por los servicios de los ecosistemas, como la salud, el empleo e ingresos, y abastecimiento de bienes naturales (Oudenhoven, Petza, Alkemadeb, Heina, & de Groot, 2012). El primer paso hacia una evaluación completa y adecuada de los bienes y servicios de los ecosistemas implica la comprensión de la complejidad ecológica (estructuras y procesos) en un número más limitado de funciones de los ecosistemas. Estas funciones, a su vez, proporcionan los bienes y servicios que son valorados por los seres humanos (Groot, Wilson, & Boumans, 2002).

Bajo este contexto los servicios hidrológicos provenientes del sistema cuenca (incluyendo ecosistemas naturales y seminaturales) se derivan de dos funciones principales: regulación hidrológica y abastecimiento de agua. El servicio de regulación hidrológica, para este trabajo, se conceptualizó como la capacidad del sistema cuenca (incluyendo suelo y cobertura vegetal) para mantener equilibrado el flujo hídrico (caudales promedio históricos de acuerdo a las estaciones) a escala de cuenca. Un aspecto importante que debe ser considerado es que los extremos, tanto las épocas de escasez como de crecidas hidrológicas, en determinados períodos, causan daños severos a los subsistemas económico y social.

Es importante también vincular el servicio de regulación hidrológica con un momento crítico típico, con una ubicación espacial en donde se genera, así como los usuarios principales del servicio. Esto contribuye a establecer claramente el servicio de regulación hidrológica, así como establecer un vínculo directo entre oferentes y demandantes del servicio. Por otro lado los impactos negativos derivados de la incapacidad del sistema cuenca de amortiguar los caudales extremos son cada vez más frecuentes, con mayor intensidad y generalmente están asociados al mal manejo de la cobertura del suelo y a la variabilidad climática creciente.

Son diferenciables dos tipos principales de servicios ecosistémicos de regulación hidrológica, a saber: a) regulación de ciclo largo, vinculado con la infiltración profunda (recarga hídrica), filtración y flujo lento, al menos seis meses de duración en una cuenca dada; las manifestaciones de este servicio ecosistémicos están asociadas a los niveles de caudal básico (caudal de estiaje) y, b) el de regulación de flujos instantáneos, generalmente vinculados a altos niveles de lluvia, ya sea por altas intensidades instantáneas (mm/hora) o acumulación de pocos días. Las manifestaciones de este servicio ecosistémico están asociadas a altos niveles de sedimentación, deslaves, inundaciones, etc.

Para fines de este trabajo el primer tipo de servicio de regulación hidrológica se le denominará de ciclo largo o simplemente de captación, y, el segundo tipo de regulación de ciclo corto, o simplemente de regulación.

Para la gestión de los recursos hídricos y la conservación de los servicios de captación y En la Figura 2 se presenta un esquema lógico del proceso de captación y regulación hidrológica, enmarcado en el ciclo hidrológico del sistema (delimitado) Guatemala. Asimismo, se presentan los principales factores que regulan y modifican el ciclo hidrológico.

Es importante resaltar que se utiliza el enfoque analítico de sistemas, cuyos límites son los del sistema Guatemala, destacando la porción territorial, es decir, la litósfera. En este sentido las precipitaciones se conceptualizan como entradas al sistema (país), así como, la gestión socio ambiental. Las principales salidas del sistema son los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica.

A partir de esta racionalización del proceso de regulación y captación hidrológica en un sistema dado, es posible la generación de indicadores adecuados para la priorización de sitios en donde estos procesos adquieran características relevantes para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos hidrológicos. Asimismo se puede derivar una priorización de acciones estratégicas para tal fin.

Por otro lado es importante considerar el cambio climático global ya que todas las sociedades necesitan para mejorar su capacidad de adaptación para enfrentar este fenómeno. El principal desafío, es promover la capacidad de adaptación en el contexto de la competencia de los objetivos de desarrollo sostenible (Adger, Huq, Brown, Conway, & Hulme, 2003; Adger, 2006).

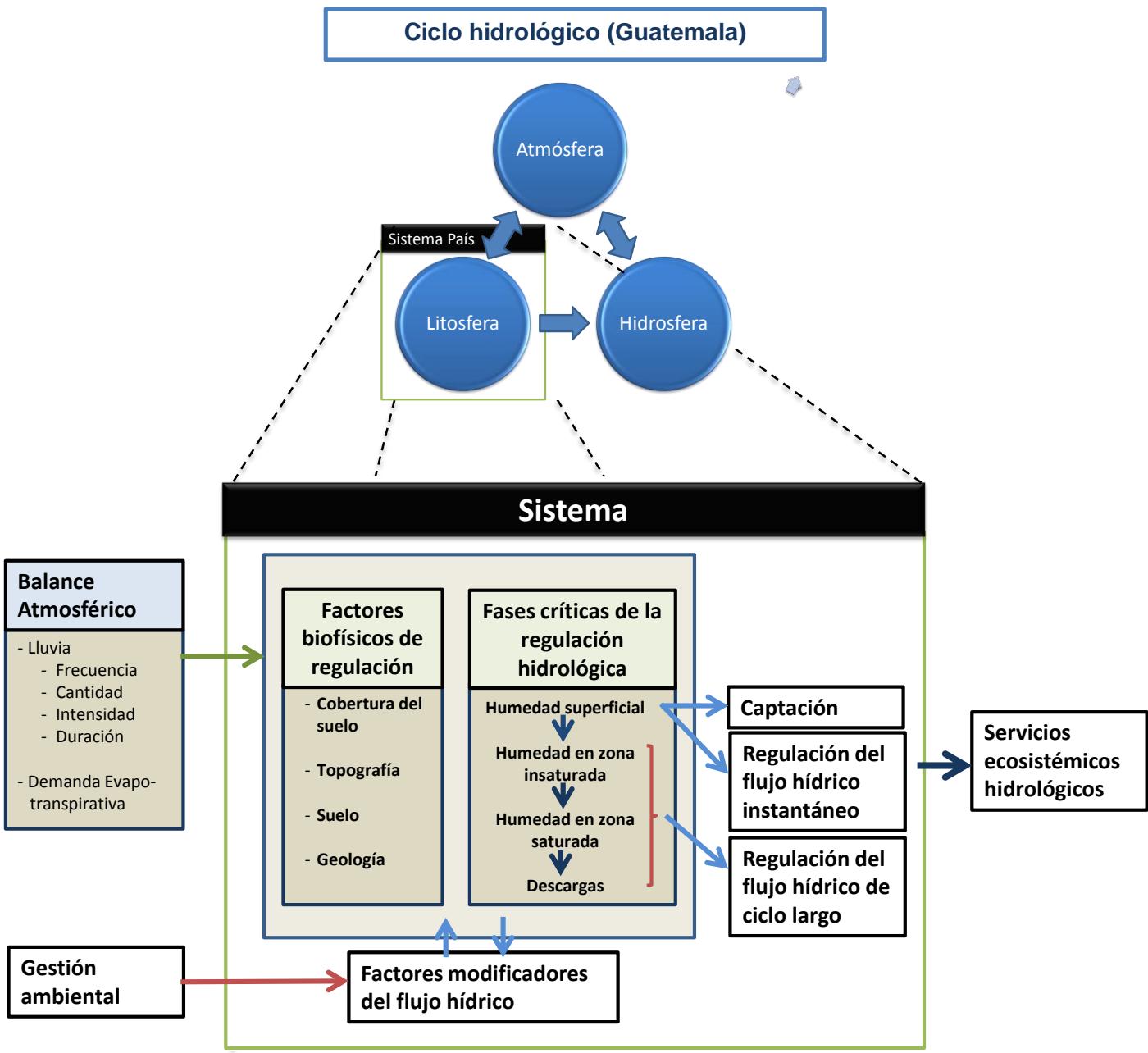
Bajo este contexto se hace fundamental evidenciar la importancia del servicio ecosistémico de la captación y regulación hidrológica en la gestión de riesgo y adaptación al cambio climático. De tal manera que actualmente las zonas críticas de captación y regulación hidrológicas adquieren aún mayor importancia por su papel en el amortiguamiento de los eventos climáticos derivados del calentamiento global y de la variabilidad climática local. Evidentemente e esto debe estar enmarcado en el análisis territorial a escala de cuenca (Burton, Huq, Lim, Pilifosova, & Schipper, 2002). (Adger, Arnal, & Tompkins, 2005; IPCC, 2001) (MDG Achievement Fund, 2010).

Se estima que los hechos, estado y necesidades sociales, económicas y ambientales (mínimas para garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos) han sobrepasado por mucho al régimen legal e institucional del agua; y que la política pública ha sido, durante los últimos 50 años, no normar de manera especial el recurso, dejando especialmente su aprovechamiento, de hecho, a la libre disposición de todos -y de nadie-, y permitiendo el surgimiento de situaciones hídricas, social y económicamente críticas en abono de comportamientos anárquicos y en detrimento del fortalecimiento del Estado de Derecho y de la consecución de la paz social (IARNA-URL, 2005).

Síntesis de la problemática de los recursos hídricos respecto a su demanda y conservación en Guatemala.

La escasez de agua es un problema muy serio, aunque el país tenga un promedio anual de lluvia de 2,000 milímetros. La distribución desigual de la población y de la lluvia, sumada al manejo ineficiente de los recursos de agua disponibles, son las causas principales de los problemas de suministro de agua.

Guatemala, posee abundancia de agua, con más de 35 cuencas importantes que se originan principalmente en las partes altas de las diferentes cadenas montañosas. Debido a la lluvia y a la abundancia de recursos de agua, se ha evidenciado que existe la cantidad de agua necesaria para cubrir la demanda, sin embargo, no hay un buen manejo de los recursos para desarrollar y mantener los requerimientos de suministro de agua. Los recursos de agua se ven agotados por el aumento de la demanda, la cual se ha desarrollado hasta llegar a una situación crítica. Este agotamiento se debe en parte a una distribución desigual de la población; las áreas más densamente pobladas son las regiones donde la disponibilidad de agua es baja debido a la altura o a un déficit de lluvia. La ciudad de Guatemala, Quetzaltenango y muchos poblados del oriente del país son un ejemplo típico. Lo contrario ocurre donde los recursos de agua son abundantes (Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América , 2000).



. Fuente: Elaboración propia.

Figura 41. Esquema de análisis sistémico del ciclo hidrológico.

El mantenimiento, recuperación, manejo y protección de la cobertura boscosa en las tierras que a nivel nacional se puedan definir como de importancia para la captación y regulación hidrológica, debe ser prioridad en las diferentes agendas institucionales relacionadas con el agua, el bosque y el ambiente en general (IARNA-URL, 2012; Gordillo , 2010). En Guatemala destacan los esfuerzos encaminados a la delimitación, fomento y conservación de las áreas importantes para regulación hidrológica destaca la propuesta del Instituto Nacional de Bosques ha desarrollado. Respecto a la delimitación se ha publicado un mapa denominado Tierras Forestales de Captación y Regulación Hidrológica. En tal sentido se evidencia que es crítico abordar y dar soporte técnico a la gestión del vínculo de las reservas de agua, los bosques y el agua contemplados en la Ley Forestal de Guatemala (Dto. 101-96) y Ley de Áreas Protegidas, los cuales son los instrumentos con mayor aplicabilidad de acuerdo al contexto institucional de Guatemala.

Planteamiento de la investigación

Guatemala, a pesar de llover 2000 mm en promedio anual es un país que presenta problemas de disponibilidad de agua, especialmente en algunas regiones (regiones secas) y en épocas específicas (época seca de febrero a abril). Lo anterior se deriva de una distribución espacial y temporal de las lluvias muy heterogénea y cambios en el patrón de las lluvias probablemente vinculados al cambio climático global. Además existe evidencia de un alto nivel de contaminación de los recursos hídricos superficiales y degradación ambiental en general. Un indicador de esto último es la tasa de deforestación anual cercana al 1.4% (una de las más altas del mundo) durante más veinte años.

De acuerdo a la grave problemática y el incipiente marco institucional vinculado al agua, se considera crítico y estratégico la delimitación, fomento y conservación de las áreas importantes por su función de captación y regulación hidrológica.

Se ha evidenciado contundentemente la importancia de la gestión de ecosistemas terrestres para la sostenibilidad en el abastecimiento de recursos hídricos, así como para encarar el riesgo creciente en el marco del cambio climático. La política pública relacionada con el agua ha sido reiteradamente evaluada como muy débil en cuanto a logros en el pasado.

Se considera fundamental basarse en las necesidades y marcos legales e institucionales de la actualidad para apoyar, con una buena base científica, las iniciativas e instituciones con responsabilidad legal e intervención en el tema. En tal sentido es necesario desarrollar un marco conceptual, basarse en unidades territoriales de gestión hidrológica local y que al mismo tiempo tengan un contexto regional y nacional, es decir las microcuencas; y finalmente definir métodos objetivos para la priorización así como aportar directrices generales de intervención.

A continuación se presenta los procesos metodológicos y resultados y su discusión de la implementación de un índice de captación y regulación hidrológica (ICRH) a escala de microcuenca.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Clasificar y priorizar unidades territoriales básicas para la gestión hidrológica (microcuencas) por su papel en la captación y regulación hidrológica en Guatemala.

2.2 Objetivos específicos.

Categorizar y priorizar microcuencas críticas para la captación y regulación hidrológica a escala de microcuenca.

Definir **directrices generales** de conservación o restauración en las microcuencas priorizadas.

Analizar las implicaciones de la clasificación de microcuencas en la gestión de recursos hídricos

3. Metodología.

Para cumplir con el objetivo de identificar y priorizar reservas potenciales de agua en Guatemala y definir acciones estratégicas para su conservación y manejo se realizó el siguiente procedimiento.

3.1 Categorización y priorización de microcuencas de acuerdo a sus atributos de captación y regulación hidrológica.

Se realizó una recopilación o actualización de información pertinente para definir el marco biofísico de los recursos hídricos en Guatemala, es decir, se integró la información secundaria, especialmente, la geográfica y de cartografía básica oficial.

Las principales fuentes de información fueron: publicaciones de los institutos universitarios de investigación, especialmente, de las universidades Rafael Landívar y San Carlos de Guatemala, Instituto Nacional de Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (SIG-MAGA)

Se contó con información existente respecto a la delimitación de cuencas hidrológicas de Guatemala como unidad física y geográfica básica para identificar los sitios importantes para la captación y la regulación hidrológica. En tal sentido la microcuenca, para este trabajo, se define en su forma más simple, como la unidad de respuesta hidrológica y se delimita por un borde exterior o parte aguas y la existencia de un punto de drenaje o aforo, que se caracteriza por la acumulación de corrientes de agua, temporal o permanentemente.

En el caso de los ecosistemas acuáticos, la unidad de análisis de la cuenca (o microcuenca) hidrológica permite entender los procesos naturales (hidrológicos, geomorfológicos y ecológicos) que rigen su funcionamiento y evolución, y por tanto, los elementos clave para su conservación o gestión (SEMARNAT, 2011). Se utilizará como referencia el trabajo publicado por MAGA en 2012 que contiene la división hidrológica de Guatemala hasta el nivel ocho de redes de drenaje.

De acuerdo al marco conceptual sistémico definido en el marco conceptual se establecieron 17 indicadores para definir las microcuencas críticas para la captación y regulación hidrológica (Figura 4 y Cuadro 1). Estos indicadores se agrupan en 5 componentes, los cuales son:

- Captación y regulación del flujo hídrico de ciclo largo
- Regulación hídrica instantánea
- Impacto socioeconómico, o servicios ecosistémicos hidrológicos, y riesgo de la regulación hidrológica.
- Gestión ambiental relacionados con la conservación y almacenamiento hidráulico
- Estado de los factores modificadores del flujo hídrico. Estos últimos son generalmente alterados por la sociedad.

Para la integración de estos indicadores se utilizará una matriz de priorización. En el Cuadro 1 se muestran detalladamente los indicadores, la escala de aplicación, método y fuentes básicas para su obtención, así como su ponderación. El producto final de la integración de indicadores será la priorización de microcuencas para Guatemala, a través de la construcción de un indicador, el cual se le denominó ICRH o Indicador de Captación y Regulación Hidrológica.

El procedimiento metodológico de la construcción del ICRH, obedece principalmente a los siguientes principios y aspectos constitutivos:

- Incorporar la totalidad de los componentes importantes del modelo conceptual del ciclo hidrológico, es decir que sea integral y sistémico. En tal sentido se definieron los siguientes componentes: Componente 1 Captación y regulación del flujo hidrológico largo (anual) Componente 2, Regulación del flujo hídrico instantáneo; Componente 3, Impacto socioambiental (servicios ecosistémicos de provisión hidrológica); Componente 4, Gestión ambiental (relacionada con la conservación de los servicios de regulación hidrológica), y , Componente 5, Estado de los componentes biofísicos más importantes para la regulación del ciclo hidrológico a nivel de cuenca (Ver Figura 4 y Cuadro 1)
- Ser de fácil interpretación cuantitativa. El ICRH puede tener un valor máximo de 100 y un mínimo de 0, de acuerdo al puntaje obtenido con la suma de componentes e indicadores que lo conforman, tal como se muestra en el Cuadro 1
- Ser equilibrado entre los diferentes componentes del modelo conceptual del ciclo hidrológico sistémico, por eso se le otorgó pesos iguales (20 puntos) a cada uno de los componentes que lo conforman.
- Integrar únicamente la mejor información disponible en sistemas de información geográfica. Se utilizó solamente información geográfica y estadística confiable.
- Contar con indicadores y procesos metodológicos claros, objetivos. Es importante que se pueda visualizar y evidenciar el efecto de cada indicador y componente al ICRH a la resultante categorización de las microcuenas. Una estrategia recomendada es no usar una gran cantidad de indicadores y que los mismos sean muy comprensibles.

En la Figura 3 se muestran en recuadros blancos cada uno de los componentes y en recuadros celestes cada uno de los indicadores definidos. En el Cuadro 1 se integran los indicadores y componentes con la descripción, definición de escala de aplicación, puntuación específica, metodología básica y fuentes para su obtención.

Respecto a las escalas de estudio, de acuerdo a la naturaleza de cada indicador y de la información disponible, puede ser uno de dos tipos a saber: a) escala de microcuenca (escala local) y b) escala de cuencas (mesoescala). La primera escala se utiliza cuando es preciso destacar la información local y la escala de cuenca cuando es más adecuado utilizar la mesoescala. Un ejemplo de esta última escala es el análisis de la provisión de agua para hogares, en la cual se consideró más adecuado tomar en cuenta la demanda de agua de la cuenca en general, para relacionar y explicitar la importancia e influencia de las microcuenas en las partes altas de montaña (por ejemplo), y no solamente las microcuenas con influencia local. La misma situación se puede considerarse para otros aspectos de la regulación hidrológica vinculados a población con riesgo a inundaciones, a sequías, a deslaves, relación de demanda y oferta hídrica, existencia de cuerpos naturales de almacenamiento hídrico, existencia de aprovechamientos de hidroelectricidad, etc. A continuación se presentan se presenta la Figura 3 y Cuadros 1 y 2 en los cuales se ilustra y explica lo anterior.

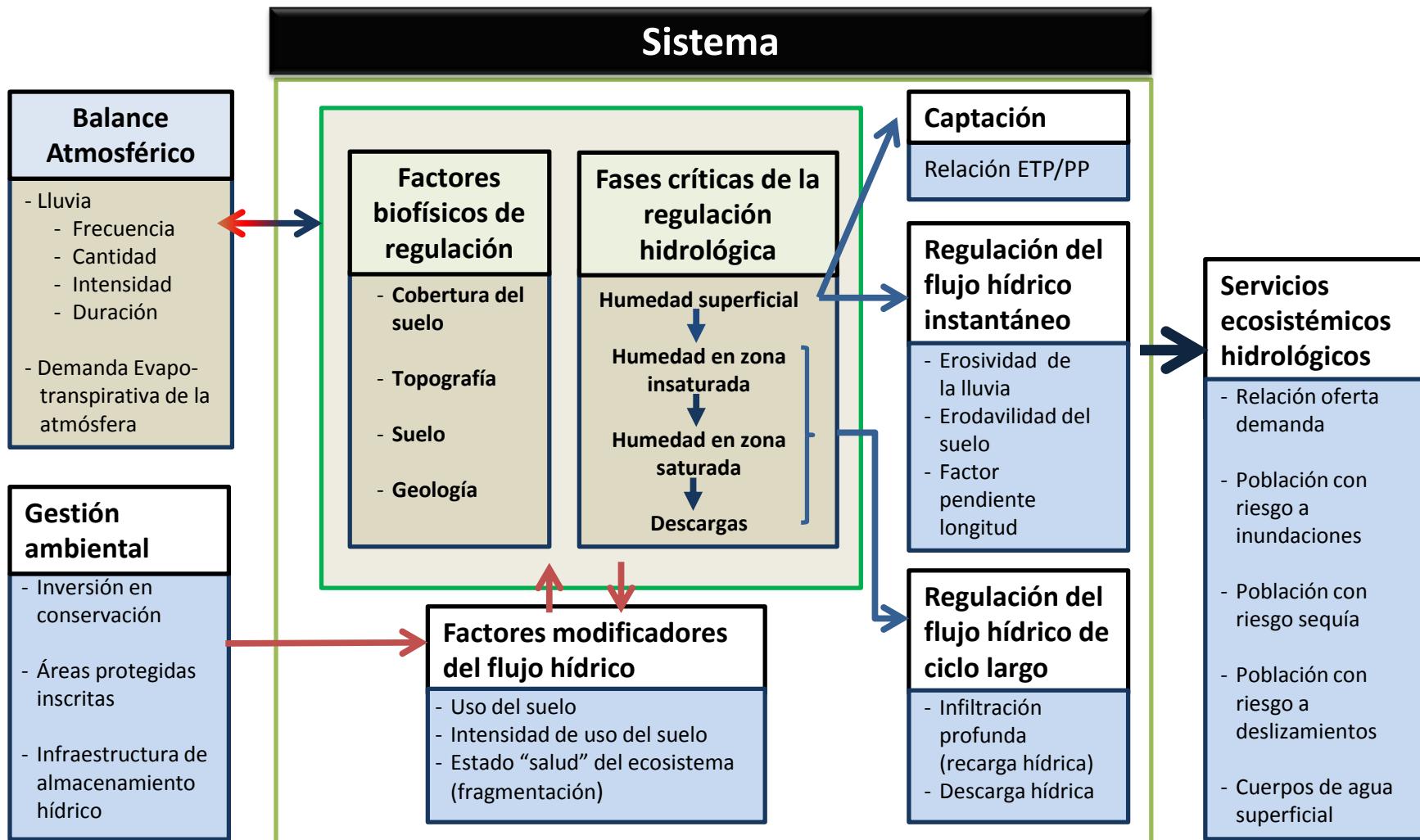


Figura 42. Definición de indicadores para priorización de microcuencas de acuerdo a un marco conceptual sistémico.

Cuadro 14. Descripción de los componentes 1, 2 y 3 para la obtención del ICRH.

Componente	Código	Indicadores de aproximación	Unidades de medida	Escala	Ponderación/ indicador	Fuente
Captación y regulación del flujo hídrico de ciclo largo (anual)	1.1.	Balance hídrico atmosférico (relación ETP/ precipitación)	Razón (ETP anual/Lluvia anual)	Promedio microcuenca	10	Mapa bioclimático de Zonas de Vida, basado en Holdridge (IARNA; 2014)
	1.2.	Balance hídrico de suelos (recarga hídrica potencial)	mm/año	Total cuenca	10	Balance Hídrico, basado en modelo SWAP (IARNA, 2013)
Suma componente					20	
Regulación de flujo hídrico instantáneo	2.1	Erodabilidad de los suelos	Factor USLE K	Promedio microcuenca	5	Capas correspondientes provenientes del mapa de erosión potencial de suelos (MAGA 2001)
	2.2	Erosividad de la lluvia	Factor USLE R	Promedio microcuenca	5	
	2.3	Pendiente longitud	Factor USLE Ls	Promedio microcuenca	5	
	2.4	Ubicación fisiográfica en área de regulación hídrica de cuenca	% de superficie en parte alta de la cuenca	Promedio microcuenca	5	Mapa de fisiografía de cuencas (IARNA 2010)
Suma componente					20	
Impacto socio ambiental (servicios ecosistémicos y riesgo)	3.1	Riesgo a inundaciones	Población expuesta	Total cuenca	4	Elaboración propia basado en MAGA 2001
	3.2	Riesgo a sequías	Población expuesta	Total cuenca	4	Elaboración propia basado en MAGA 2001
	3.3	Susceptibilidad a deslizamientos	Población expuesta	Total microcuenca	4	Elaboración propia basado en MAGA 2001
	3.4	Relación Oferta / Demanda	Población en cotas inferiores	Total cuenca	4	Elaboración propia basado en MAGA 2001
	3.5	Existencia de cuerpo natural de almacenamiento de agua	% de superficie	Total subcuenca	4	Elaboración propia basada en IARNA 2014
Suma componente					20	

Cuadro 15. Descripción de los componentes 4 y 5 para la obtención del ICRH

Cuadro 2. Descripción de los componentes 4 y 5 para la obtención de ICRH

Componente	Código	Indicadores de aproximación	[Unidades de medida]	Escala	Ponderación / indicador	Fuente
Gestión ambiental relacionada con conservación y almacenamiento de agua	4.1	Inversión municipal per cápita en conservación	Gasto municipal	Promedio microcuenca	5	IARNA-SEGEPLAN, 2013
	4.2	Existencia de obras de almacenamiento hídrico	Índice de acuerdo caudal requerido	Cuenca	5	Elaboración propia basada en CONAP, 2010
	4.3.	Áreas protegidas registradas	% área microcuenca	Microcuenca	10	Elaboración propia basada en INDE y MAGA
Suma componente					20	
Factores modificadores del flujo hídrico natural	5.1	Cobertura forestal	% de cobertura forestal	Microcuenca	9	Elaboración propia basada en Mapa de cobertura forestal 2010 (INAB, CONAP, IARNA-URL y UVG; 2011)
	5.2	Densidad de ecosistemas naturales	% porcentaje del territorio con bosques densos	Cuenca	2	
	5.4	Conflictos de uso del suelo	% de uso adecuado del suelo	Microcuenca	9	Elaboración propia basada en Mapa de Capacidad de Uso del Suelo (INAB, 2001) y Mapa de Cobertura Forestal 2010 (INAB, CONAP, IARNA-URL, UVG; 2011)
Suma componente					20	
TOTAL ICRH						100

Posterior a la definición y ponderación total de los componentes e indicadores correspondientes, se procedió a definir la valoración de cada categoría específica de los indicadores definidos. En términos generales se establecieron cinco categorías para cada indicador dándole una valoración distribuida equitativamente desde 0 hasta el valor más alto posible para el mismo (Cuadros 3 y 4).

Por ejemplo, el indicador de balance hídrico atmosférico tiene una valoración máxima posible de 10. En tal sentido se subdividieron cinco sub categorías posibles siendo la unidad de medida la razón evapotranspiración potencial (ETP) total anual dividido por la precipitación anual (ETP/pp). Para esta variable los valores en los que este valor es 2 o mayor se considera microcuencas muy secas (la ETP al menos duplica a la precipitación), entre 2 y 1 bosque seco, entre 1 y 2 subhumedo, si este valor es menor a 0, significa que la ETP es menor a la precipitación, es decir las microcuencas son húmedas. De esta manera se tiene que para el valor de la razón ETP/pp entre 1 y 0.5 la microcuenca es húmedo y si es menor de 0.5 el ecosistema es muy húmedo. Definidas estas subcategorías del indicador se procedió a darle una valoración distribuida desde 0 hasta 10. Microcuenca muy seca su valor es 0, microcuenca seca (valor 2.5), microcuenca subhúmeda (valor 5), microcuenca húmeda (valor 7.5) y microcuenca muy húmeda (valor 10). Entre más importante sea la microcuenca en función de los servicios de regulación hidrológica definida más valoración obtendrá. Además estas subcategorías muy bajas se identifican con color naranja, las intermedias con color verde, mientras que las subcategorías altas se identifican con color azul. Esto es útil para su interpretación en los mapas resultantes que posteriormente se explicarán.

Al tener la sumatoria de los indicadores se agrupó para cada componente la sumatoria y de igual manera se integraron en cinco grupos distribuidos en categorías equitativas. Es decir de 20 puntos posibles el Grupo 1 es aquel que conforma a las cuencas con puntuaciones entre 16 y 20, siendo el Grupo 2 entre 12 y 16, y así sucesivamente, hasta el Grupo 5 con puntuaciones entre 0 y 4.

Cuadro 16. Matriz para la valoración de microcuencas, componentes 1, 2 y 3 del ICRH

Componente	Código	Indicadores de aproximación	[Unidades de medida]	Ponderación/indicador	Categorías	Valoración			
Captación y regulación del flujo hídrico de ciclo largo (anual)	1.1.	Balance hídrico atmosférico (relación ETP/ precipitación)	Razón (ETP anual/Lluvia anual)	10	Muy Seco	0			
					Seco	2.5			
	1.2.	Balance hídrico de suelos (recarga hídrica potencial)	mm/año	10	Subhúmedo	5			
					Húmedo	7.5			
					Muy Húmedo	10			
					< 100	0			
					100 - 200	2.5			
					200 - 300	5			
					300 - 400	7.5			
					> 400	10			
Suma componente					20				
Regulación de flujo hídrico instantáneo	2.1	Erodabilidad de los suelos	Factor USLE K	5	Muy < 0.15	0			
					0.15 - 0.30	1.25			
	2.2	Erosividad de la lluvia	Factor USLE R	5	0.30 - 0.45	2.5			
					0.45 - 0.60	3.75			
	2.3	Pendiente longitud	Factor USLE Ls	5	> 0.60	5			
					< 165	0			
	2.4	Ubicación fisiográfica en área de regulación hídrica de cuenca	% de superficie en parte alta de la cuenca	5	165 - 260	1.25			
					260 - 375	2.5			
					375 - 520	3.75			
					> 520	5			
					< 1.5	0			
					1.5 - 2	1.25			
					2 - 2.5	2.5			
					2.5 - 3	3.75			
					> 3	5			
					0 - 20 %	0			
					20 - 40 %	1.25			
					40 - 60 %	2.5			
					60 - 80 %	3.75			
					80 - 100%	5			
Suma componente					20				
Impacto socio ambiental (servicios ecosistémicos y riesgo)	3.1	Riesgo a inundaciones	Población expuesta	4	0	0			
					0 - 25,000	1			
	3.2	Riesgo a sequías	Población expuesta	4	25,000 - 50,000	2			
					50,000 - 100,000	3			
	3.3	Susceptibilidad a deslizamientos	Población expuesta	4	> 100,000	4			
					0	0			
	3.4	Relación Oferta / Demanda	Población en cotas inferiores	4	0 - 25,000	1			
					25,000 - 50,000	2			
	3.5	Existencia de cuerpo natural de almacenamiento de agua	% de superficie	4	50,000 - 100,000	3			
					> 100,000	4			
					< 2.5	0			
					2.5 - 5	1			
					5 - 10	2			
					10 - 25	3			
					> 25	4			
					< 0.32 %	0			
					0.32 - 0.64 %	1			
					0.64 - 1.28 %	2			
					1.28 - 2.56 %	3			
					> 2.56 %	4			
Suma componente					20				

Continuación Cuadro 3. Matriz para la valoración de microcuenca, componentes 4 y 5 del ICRH.

Componente	Código	Indicadores de aproximación	[Unidades de medida]	Ponderación/indicador																						
Gestión ambiental relacionada con conservación y almacenamiento de agua	4.1	Inversión municipal per cápita en conservación	Gasto municipal	5	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0 - 50</td><td>1.25</td></tr> <tr><td>50 - 100</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>100 - 300</td><td>3.75</td></tr> <tr><td>> 300</td><td>5</td></tr> </table>	0	0	0 - 50	1.25	50 - 100	2.5	100 - 300	3.75	> 300	5	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1.25</td><td>1.25</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>3.75</td><td>3.75</td></tr> <tr><td>5</td><td>5</td></tr> </table>	0	0	1.25	1.25	2.5	2.5	3.75	3.75	5	5
0	0																									
0 - 50	1.25																									
50 - 100	2.5																									
100 - 300	3.75																									
> 300	5																									
0	0																									
1.25	1.25																									
2.5	2.5																									
3.75	3.75																									
5	5																									
4.2	Existencia de obras de almacenamiento hídrico	Índice de acuerdo caudal requerido	5	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1 - 25 %</td><td>1.25</td></tr> <tr><td>25 - 50 %</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>50 - 75 %</td><td>3.75</td></tr> <tr><td>75 - 100 %</td><td>5</td></tr> </table>	0	0	1 - 25 %	1.25	25 - 50 %	2.5	50 - 75 %	3.75	75 - 100 %	5	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1.25</td><td>1.25</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>3.75</td><td>3.75</td></tr> <tr><td>5</td><td>5</td></tr> </table>	0	0	1.25	1.25	2.5	2.5	3.75	3.75	5	5	
0	0																									
1 - 25 %	1.25																									
25 - 50 %	2.5																									
50 - 75 %	3.75																									
75 - 100 %	5																									
0	0																									
1.25	1.25																									
2.5	2.5																									
3.75	3.75																									
5	5																									
4.3.	Áreas protegidas registradas	% área microcuenca	10	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0 - 50</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>50 - 100</td><td>5</td></tr> <tr><td>100 - 300</td><td>7.5</td></tr> <tr><td>> 300</td><td>10</td></tr> </table>	0	0	0 - 50	2.5	50 - 100	5	100 - 300	7.5	> 300	10	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>2.5</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>5</td><td>5</td></tr> <tr><td>7.5</td><td>7.5</td></tr> <tr><td>10</td><td>10</td></tr> </table>	0	0	2.5	2.5	5	5	7.5	7.5	10	10	
0	0																									
0 - 50	2.5																									
50 - 100	5																									
100 - 300	7.5																									
> 300	10																									
0	0																									
2.5	2.5																									
5	5																									
7.5	7.5																									
10	10																									
Suma componente				20																						
Factores modificadores del flujo hídrico natural	5.1	Cobertura forestal	% de cobertura forestal	9	<table border="1"> <tr><td>0 - 10 %</td><td>0</td></tr> <tr><td>10 - 20 %</td><td>1.75</td></tr> <tr><td>20 - 40 %</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>40 - 80 %</td><td>6.25</td></tr> <tr><td>80 - 100 %</td><td>9</td></tr> </table>	0 - 10 %	0	10 - 20 %	1.75	20 - 40 %	4.5	40 - 80 %	6.25	80 - 100 %	9	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1.75</td><td>1.75</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>6.25</td><td>6.25</td></tr> <tr><td>9</td><td>9</td></tr> </table>	0	0	1.75	1.75	4.5	4.5	6.25	6.25	9	9
0 - 10 %	0																									
10 - 20 %	1.75																									
20 - 40 %	4.5																									
40 - 80 %	6.25																									
80 - 100 %	9																									
0	0																									
1.75	1.75																									
4.5	4.5																									
6.25	6.25																									
9	9																									
5.2	Densidad de ecosistemas naturales	% porcentaje del territorio con bosques densos	2	<table border="1"> <tr><td>0 - 10 %</td><td>0</td></tr> <tr><td>10 - 20 %</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>20 - 40 %</td><td>1</td></tr> <tr><td>40 - 80 %</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>80 - 100 %</td><td>2</td></tr> </table>	0 - 10 %	0	10 - 20 %	0.5	20 - 40 %	1	40 - 80 %	1.5	80 - 100 %	2	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>0.5</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1.5</td><td>1.5</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td></tr> </table>	0	0	0.5	0.5	1	1	1.5	1.5	2	2	
0 - 10 %	0																									
10 - 20 %	0.5																									
20 - 40 %	1																									
40 - 80 %	1.5																									
80 - 100 %	2																									
0	0																									
0.5	0.5																									
1	1																									
1.5	1.5																									
2	2																									
5.4	Conflictos de uso del suelo	% de uso adecuado del suelo	9	<table border="1"> <tr><td>0 - 15 %</td><td>0</td></tr> <tr><td>15 - 30 %</td><td>1.75</td></tr> <tr><td>30 - 50 %</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>50 - 70 %</td><td>6.25</td></tr> <tr><td>70 - 100 %</td><td>9</td></tr> </table>	0 - 15 %	0	15 - 30 %	1.75	30 - 50 %	4.5	50 - 70 %	6.25	70 - 100 %	9	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1.75</td><td>1.75</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>4.5</td></tr> <tr><td>6.25</td><td>6.25</td></tr> <tr><td>9</td><td>9</td></tr> </table>	0	0	1.75	1.75	4.5	4.5	6.25	6.25	9	9	
0 - 15 %	0																									
15 - 30 %	1.75																									
30 - 50 %	4.5																									
50 - 70 %	6.25																									
70 - 100 %	9																									
0	0																									
1.75	1.75																									
4.5	4.5																									
6.25	6.25																									
9	9																									
Suma componente				20																						
TOTAL ICRH				100																						

3.2 Definición de directrices generales de conservación o restauración.

Posterior a la primera fase de priorización de microcuencas para la captación y regulación hidrológica con un análisis sistémico se procedió a definir acciones estratégicas para su conservación o restauración.

Para tal fin se elaboró un árbol de decisión (Figura 4), que es un modelo de predicción utilizado en el ámbito de la inteligencia artificial (SEMARNAT, 2011). Dada una base de datos se definen diagramas de construcciones lógicas, muy similares a los sistemas de predicción basados en reglas, que sirven para representar y categorizar una serie de condiciones que ocurren de forma sucesiva, para la resolución de un problema. Las variables y su interpretación son analizadas y se categorizan algunas de ellas para poder relativizar el valor de conservación o las presiones en las microcuencas. De esta forma se pueden obtener los resultados según tres categorías:

- a) Unidades con “prioridad media” para ser reservas;
- b) Unidades con “alta prioridad”; y
- c) Unidades con “muy alta prioridad”;

Para desarrollar el árbol de decisión se aplicaron los siguientes criterios de decisión de priorización:

- No serán la mayor prioridad aquellas unidades de gestión que no tengan alta captación y regulación hidrológica.
- Se considerará que una cuenca tiene una gran importancia de conservación cuando cumple la doble función, además de la anterior, la regulación del flujo hídrico instantáneo
- Una cuenca tendrá una factibilidad muy alta para ser declarada reserva de agua cuando tenga alta importancia de conservación (áreas protegidas) y sus servicios ecosistémicos hidrológicos sean considerados como importante para la sociedad, además de los dos anteriores atributos.
- Cuando una cuenca con gran interés de conservación presente alguna amenaza, su prioridad será alta o media. Las amenazas son aquellos atributos que claramente pueden dificultar la viabilidad de la gestión. Algunas amenazas identificadas son: alta densidad poblacional, muy altos conflictos de uso del suelo (ver adelante la definición) y muy baja inversión municipal en la conservación de la cuenca
- Cuando una cuenca no tenga gran importancia de regulación hidrológica pero presente áreas protegidas podrá ser considerada como de alta prioridad siempre y cuando no existan amenazas importantes sobre la misma.

Cabe mencionar que los valores relativos para definir las categorías alta y baja fueron obtenidos por medio del análisis de los resultados obtenidos anteriormente. Con base a la experiencia de los expertos se definieron microcuencas la cuales fueron objeto de una revisión final, que consistió en definir la existencia de conflictos de uso del suelo como último criterio de selección. Es decir, el uso del suelo que excede la máxima capacidad productiva del mismo. Por ejemplo,

- que un sitio tenga definido como su potencial máximo de productividad el uso forestal (alta pendiente y baja profundidad), sin embargo que éste presente uso agrícola.
- Si los conflictos de uso del suelo exceden el 50% de la superficie de la microcuenca con sobre de uso del suelo, se define que las acciones a realizar en esta son de restauración.
- Si el valor de conflictos de uso del suelo es menor al 50% se define como de conservación.

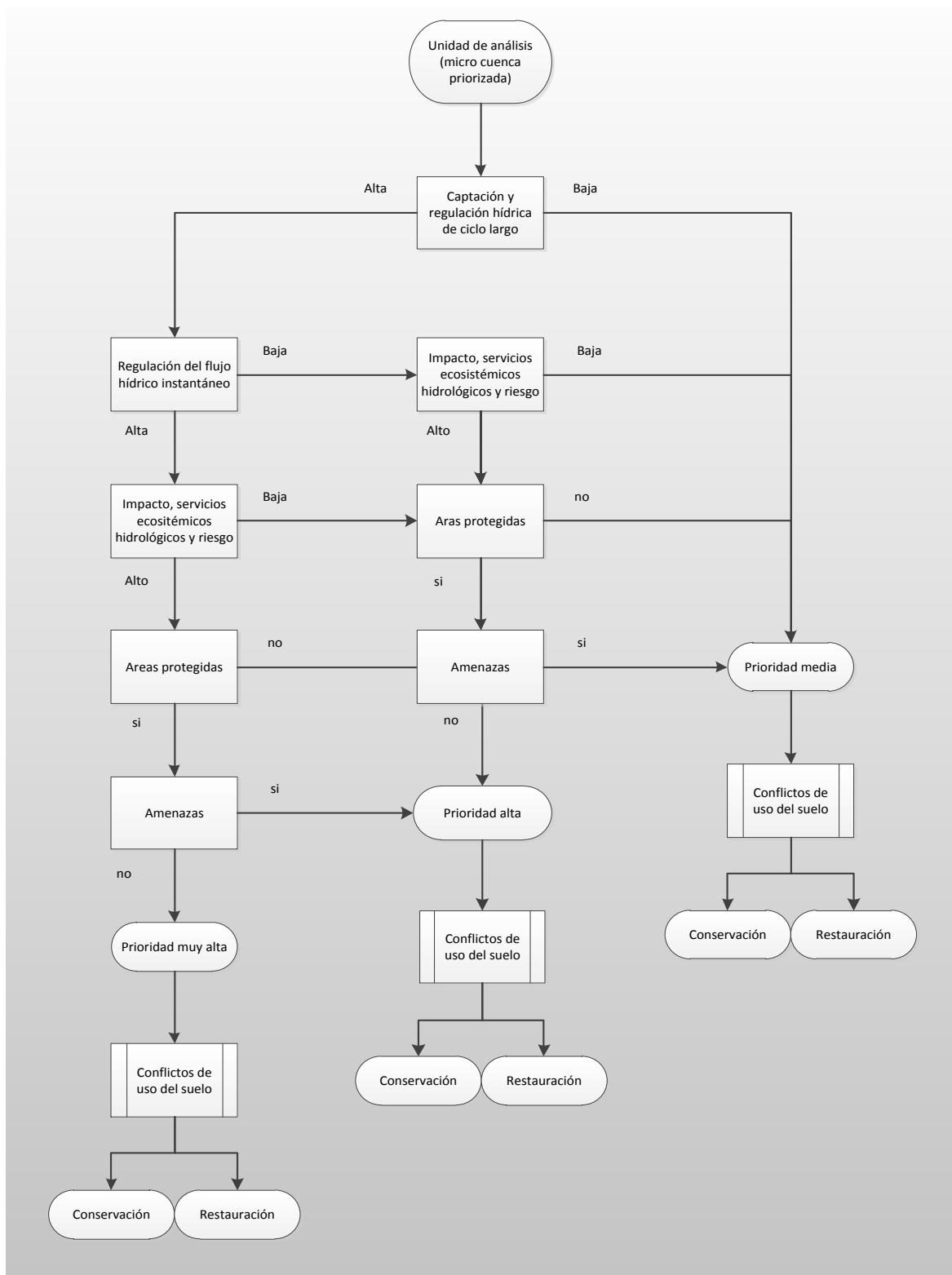


Figura 43. Árbol de decisión para la determinación de acciones prioritarias de conservación o restauración en microcuenca.

4. Resultados y discusión.

4.1 Hidrología general de Guatemala

De acuerdo al servicio climático de Guatemala (INSIVUMEH, 2001) el territorio de la República de Guatemala, se puede dividir en tres grandes vertientes (ver Figura 5), de acuerdo al punto donde desembocan finalmente todos los ríos que atraviesan y/o nacen en el territorio nacional. En forma general, los ríos en una misma vertiente son similares, pero cada vertiente tiene condiciones propias que afectan las características de los ríos que están incluidos en ella. Estas vertientes se enumeran a continuación (Ver Figura 5):

- Vertiente del Pacífico
- Vertiente del Caribe (Atlántico o del Mar de las Antillas)
- Vertiente del Golfo de México

4.1.1 Oferta hídrica natural

Para definir la oferta hídrica natural de Guatemala se subdivide en dos componentes principales, los cuales son agua superficial y subterránea, las cuales se describen a continuación:

Agua superficial

En total, Guatemala posee un escurrimiento superficial entre 1,760 y 3,190 m³/s (equivalente a 55.6 y 100.6 miles de millones de m³ por año), los cuales están concentrados durante seis u ocho meses (dependiendo de la región), durante la denominada estación lluviosa. El 55% del territorio lo forman cuencas de repercusión internacional cuyas aguas, en un 47.5%, van hacia México, 7% a El Salvador, 6% hacia Belice y una mínima fracción de 0.5% hacia Honduras. En el Cuadro 3 se presenta con más detalle la disponibilidad hídrica anual por cuencas y vertientes, así como la descripción de los sistemas lacustres y embalses en Guatemala. En Anexos se presenta un listado y descripción cartográfica del sistema de cuencas a nivel nacional.

Los ríos más caudalosos son el Usumacinta (1800 m³/s), Motagua (240 m³/s), Polochic (161 m³/s), Sarstún (172 m³/s) e Ixcán (165 m³/s). En la costa sur, el río Suchiate (28 m³/s) es el de mayor caudal. SEGEPLAN y BID (2006) estiman una oferta hídrica de 97,120 millones de m³; en tanto que IARNA-URL (2006) en 93,388 millones de m³.

Agua subterránea

El agua dulce proveniente de pozos y fuentes constituye un recurso esencial y a la vez grande de suministro de agua para el consumo. El agua proveniente de pozos y vertientes se usa para propósitos agrícolas, industriales, públicos y privados. Sin embargo, la disponibilidad de agua subterránea es altamente variable. El continuo acceso a ésta y el desarrollo de suministros de agua subterránea confiables y seguros son asuntos importantes que involucran al gobierno de Guatemala así como también a muchas organizaciones internacionales y privadas (Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América , 2000).

Se estima que el volumen de las aguas subterráneas es de 33,699 millones de m³, de acuerdo al balance hídrico preparado por INSIVUMEH para la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO)(IARNA-URL, 2005).

El agua subterránea es generalmente abundante en acuíferos sedimentarios a través de las planicies, valles y tierras bajas del país. Sin embargo, en las áreas montañosas la disponibilidad de agua dulce varía considerablemente de localmente abundante a insuficiente para su uso. Las montañas de Guatemala tienen muchos tipos de acuíferos, incluyendo acuíferos cársticos y de rocas calizas fracturadas; acuíferos volcánicos piroclásticos y con depósitos de lava, permeables sedimentarios, ígneos y metamórficos. Las planicies aluviales, valles y tierras bajas constituyen el 50 % del país pero contienen aproximadamente el 70 por ciento de las reservas de agua subterránea disponibles (Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América , 2000; USAID-MAGA, 2012).

4.1.2 Demanda de recursos hídricos

En el Cuadro siguiente se presenta las estimaciones más recientes de la *Cuenta Integrada de Recursos Hídricos* (IARNA-URL, 2011), sobre la demanda de agua en el país. Los datos muestran que entre 2007 y 2010 se habrían destinado más de 20 mil millones de metros cúbicos al año (Cuadro 4). La utilización anual de agua en ese período representa entre el 20% y el 22% de la oferta hídrica disponible anualmente para Guatemala, ya que se estima ligeramente superior a 90,000 millones de m³, tal como fue referido anteriormente.

La mayor demanda hídrica en volumen (cerca del 35%), de acuerdo a los sectores económicos del país, son las actividades manufactureras, en las cuales destacan las actividades de agroindustria, tal como el beneficiado de café y azúcar. Asimismo se estima en un 30% de demanda hídrica por parte de las actividades de agricultura, ganadería, caza y silvicultura para actividades tal como el riego o consumo evapotranspirativo de los cultivos. El otro rubro importante es el de suministro de energía, con cerca del 25% del consumo de la demanda hídrica.

Cuadro 17. Distribución del uso del agua en Guatemala por las principales actividades económicas y de consumo (período 2006-2010).

Actividades económicas y de consumo	Año				
	2006	2007	2008	2009	2010
Agricultura, ganadería, caza y silvicultura	5,042.00	5,490.10	6,003.62	6,252.08	6,496.56
Pesca	427.06	535.24	527.52	511.90	514.62
Explotación de minas y canteras	6.13	6.93	6.22	6.34	6.19
Industrias manufactureras (incluye agroindustria)	7,473.39	8,185.24	8,296.74	7,604.04	7,643.17
Suministro de electricidad, gas y agua	4,765.13	5,184.56	5,516.04	5,110.16	5,057.33
Construcción	93.17	104.36	102.94	87.29	76.26
Comercio al por mayor y al por menor	51.33	44.36	44.94	47.27	48.22
Servicios	52.33	51.71	59.30	68.16	69.85
Hogares	422.93	433.51	444.35	455.45	461.68
Total	18,333.48	20,036.00	21,001.66	20,142.69	20,373.88

Fuente: Elaboración propia, con base en IARNA-URL (2011).

4.1.3 Ciclo hidrológico y cambio climático

De acuerdo al Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América (2000) el balance hídrico proyectado al año 2025 en un escenario tendencial, parte de una oferta en la que se asume que no hay cambios significativos en la distribución espacial del agua en el país. En ese sentido la oferta o disponibilidad bruta de agua equivalente a 97,120 millones de metros cúbicos, distribuidos en 23.7% en la vertiente del Pacífico, 42.2% en la vertiente del Golfo de México y 34.28% en la vertiente del Mar Caribe.

Se prevé que en la época de estiaje, la situación será conflictiva, especialmente para la vertiente del Pacífico, ya que para el año 2025 el mes más seco del año podría encontrarse en la siguiente situación: la oferta o capital hídrico será de 755 millones de m³ y si descontamos el caudal ecológico será de 566 millones de m³, el uso consuntivo alcanzará 1,056 millones de m³, es decir un déficit de agua de 301 o 490 millones de m³ (sin y con caudal ecológico, respectivamente).

La vertiente del mar Caribe también mostrará en el 2025 una situación moderadamente difícil, ya que en el mes más seco del año se utilizarán en forma consuntiva 320 millones de m³ que representa el 56% del agua disponible (573.47 millones de m³, descontando el caudal ecológico), si se añade el requerimiento no consuntivo de agua para generación eléctrica se estaría consumiendo el 88.2% del agua disponible en esa vertiente. La vertiente del Golfo de México mostrará en el 2025 una situación manejable ya que las demandas de los distintos usos representarán alrededor del 25% de la oferta hídrica.

4.2 Identificación de sitios críticos para la captación y regulación hidrológica en Guatemala a escala de microcuenca.

Basados en el modelo conceptual sistémico del ciclo hidrológico, el cual fue definido anteriormente (Figura 4), se establecieron cinco componentes y 17 indicadores, para la obtención del índice de captación y regulación hidrológica (ICRH) a escala de microcuenca. Los datos geográficos para calificar cada microcuenca de Guatemala fueron obtenidos, organizados, procesados en sistemas de información geográfica.

Un paso fundamental fue la definición cartográfica de microcuenca de acuerdo a la información oficial existente en Guatemala y publicada por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA). En términos generales se determinaron 2,391 microcuenca distribuidas de la siguiente manera: en la vertiente caribe 742 microcuenca para una cobertura del 31% del país y una extensión promedio aproximada de 4.5 millones de ha. En la vertiente del Golfo de México se contabilizan 769 microcuenca, con un promedio aproximado de 6.6 millones de ha de extensión y sumando una cobertura del 47% del país. Para la vertiente del Pacífico, la más pequeña en extensión con 22% del país pero la mayor cantidad de microcuenca, 0.88 millones de ha, con un tamaño promedio de cerca de 2,700 ha. Como referencia se presenta la Figura

Es destacable la gran variabilidad de tamaños de microcuenca, ya que van desde cerca de 300,000 a 2.5 ha. Sin embargo se considera un marco cartográfico adecuado tanto para el estudio como para ser consideradas como unidades territoriales de gestión, porque el tamaño promedio de las microcuenca definidas para el país es de 4,500 ha y la superficie de las microcuenca se adapta a las características topográficas siendo, de manera general, de mayor extensión aquellas ubicadas en sitios planos y de bajas altitudes, y menores en sitios montanos. Como referencia ver Cuadros 6 y 7 y Figuras 5, 6 y 7. Además estas Figuras se

consideran fundamentales para la comprensión del análisis de la distribución geográfica en el proceso de priorización de microcuencas. Estas referencias son el mapa de vertientes y cuencas, fisiografía y mapa de pendientes de Guatemala.

A continuación se presentan las calificaciones y respectiva distribución geográfica de las 2391 microcuencas de Guatemala, de acuerdo a cada uno de los 17 indicadores definidos. Para la adecuada interpretación de los resultados, éstos se relacionan con las tres vertientes hidrológicas de Guatemala (Caribe, Golfo de México y Pacífico), distribución geográfica de las zonas hidrológicas de Guatemala Anexos.

Cuadro 18. Datos generales de las microcuencas de Guatemala.

Vertientes hidrográficas	Área (ha)	%	Cantidad de microcuencas	Extensión promedio (ha)	Área máxima (ha)	Área mínima (ha)
Caribe	3,342,546	31	742	4,505	114,085	3.6
Golfo México	5,077,339	47	769	6,603	315,601	2.8
Pacífico	2,407,687	22	880	2,736	124,341	2.5
Total general	10,827,572	100.0	2391	4,528	315,601	2.5

Cuadro 19. Lista de cuencas y vertientes de Guatemala.

CUENCAS DE LA VERTIENTE DEL PACIFICO					
No.	Cuenca	Area (km2)	No.	Cuenca	Area (km2)
1.1	Coatán	270	1.10	Coyolate	1,648
1.2	Suchiate	1,054	1.11	Acomé	706
1.3	Naranjo	1,273	1.12	Achiguate	1,291
1.4	Ocosito	2,035	1.13	María Linda	2,727
1.5	Samalá	1,510	1.14	Paso Hondo	512
1.6	Sis - Icán	919	1.15	Los Esclavos	2,271
1.7	Nahualate	1,941	1.16	Paz	1,732
1.8	Atitlán	541	1.17	Ostúa - Güija	2,243
1.9	Madre Vieja	1,007	1.18	Olopa	310
Area total de la Vertiente del Pacífico (kms ²)					23,990

CUENCAS DE LA VERTIENTE DEL CARIBE					
No.	Cuenca	Area (km2)	No.	Cuenca	Area (km2)
2.1	Grande de Zacapa	2,462	2.5	Cahabón	2,459
2.2	Motagua	12,670	2.6	Sarstún	2,109
2.3	Río Dulce	3,435	2.7	Belice	8,159
2.4	Polochic	2,811			
Area total de la Vertiente del Caribe (kms ²)					34,105

CUENCAS DE LA VERTIENTE DEL GOLFO DE MEXICO					
No.	Cuenca	Area (km2)	No.	Cuenca	Area (km2)
9	Cuilco	2,274	3.6	Xacbal	1,366
3.2	Selegua	1,535	3.7	Chixoy	12,150
3.3	Nentón	1,451	3.8	La Pasión	12,156
3.4	Pojom	813	3.9	Usumacinta	2,638
3.5	Ixcán	2,085	3.10	San Pedro	14,335
Area total de la Vertiente del México (kms ²)					50,803



Figura 44. Vertientes y cuencas de Guatemala.

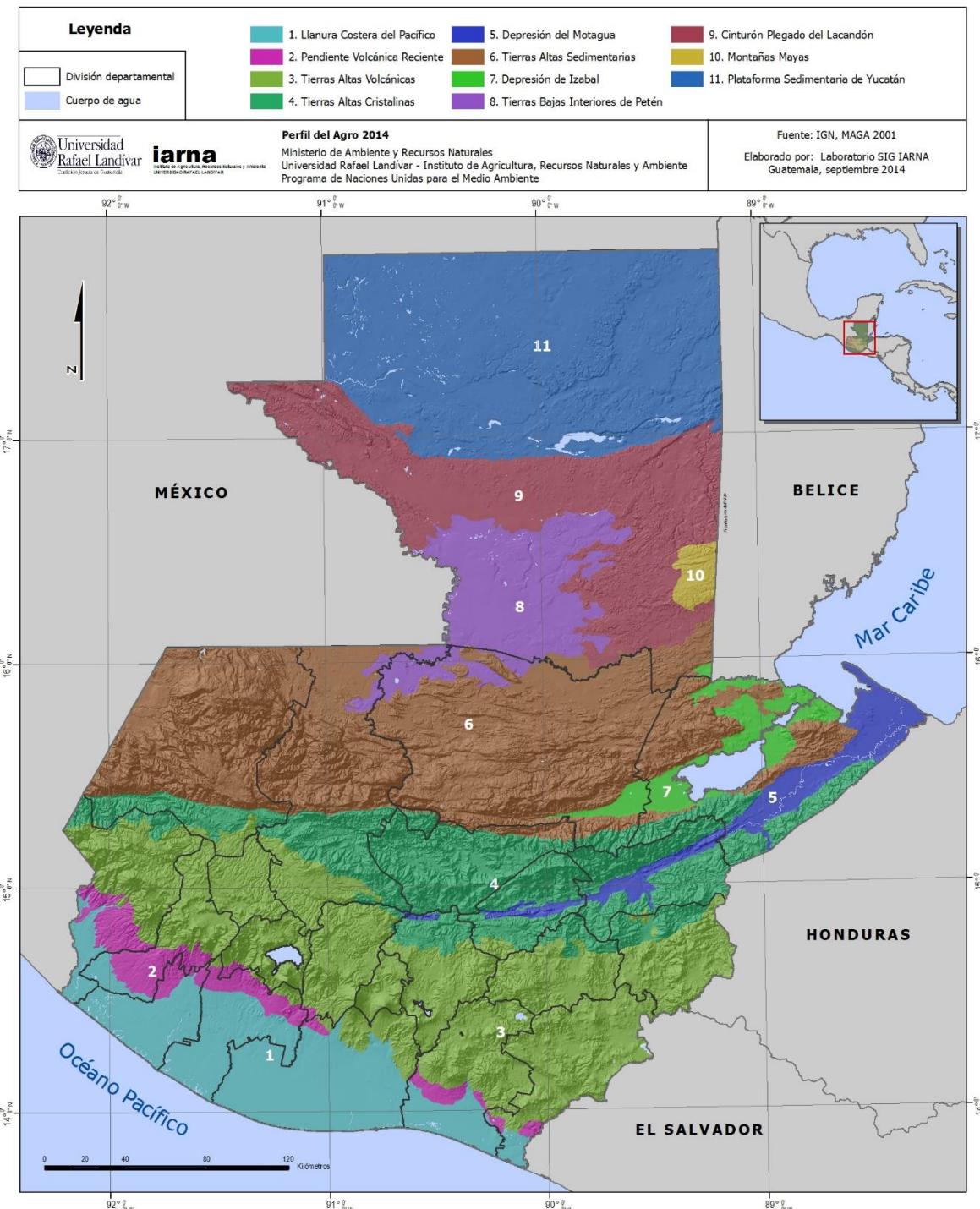


Figura 45. Vertientes y cuencas de Guatemala.

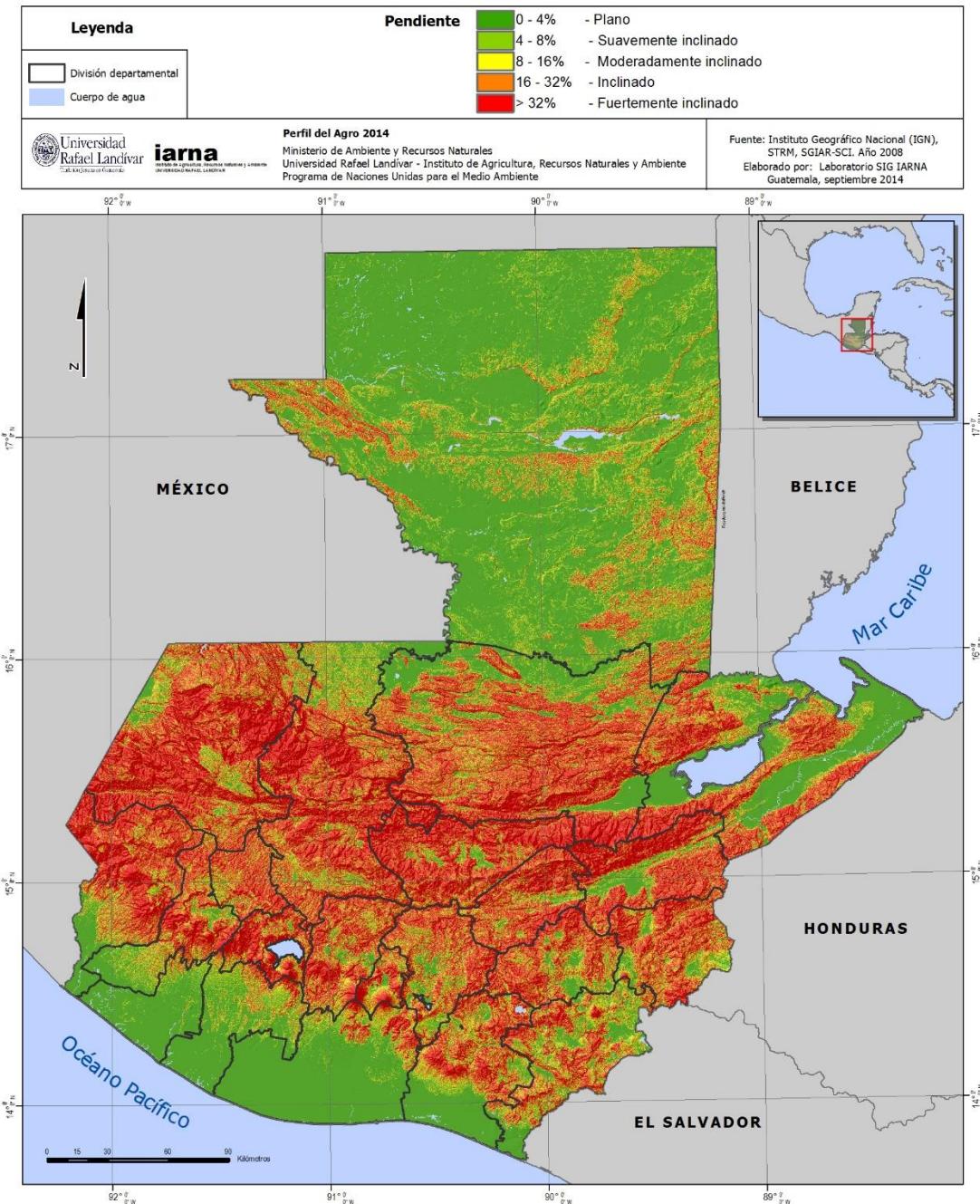


Figura 46. Mapa de pendientes y relieve de Guatemala.

4.2.1 Componente 1. Captación y regulación hidrológica del ciclo largo (anual).

Para este componente, como resulta lógico ya que integra los indicadores de balance hídrico atmosférico y recarga hídrica, destacan las cuencas y microcuencas distribuidas geográficamente en los sitios asociados a las grandes cadenas montañosas expuestas a corrientes de humedad y sitios con mayores precipitaciones de Guatemala. Destacan las cuencas asociadas a las cadenas montañosas de Cadena Volcánica al sur y suroccidente,

Sierra de las Minas al noreste y montañas al noroeste (Figura 8). En la descripción posterior de cada uno de los indicadores se desagregan estos resultados.

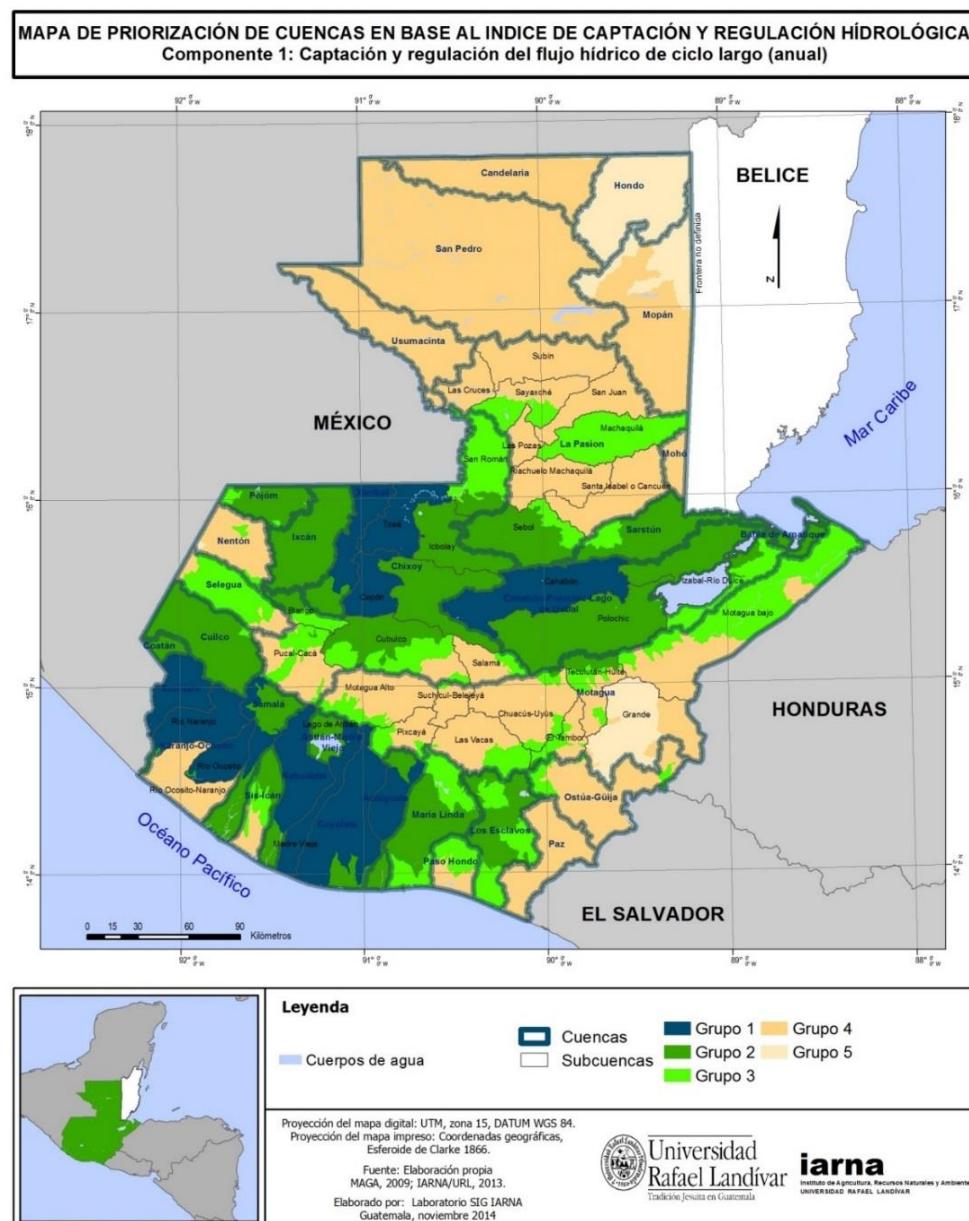


Figura 47. Integración de indicadores del Componente 1 para la integración del ICRH a escala de microcuenca.

Las microcuenca ubicadas en regiones húmedas, muy húmedas y pluviales están representadas con colores azul, verde oscuro y verde claro (Figura 9), respectivamente. Estas microcuenca se caracterizan porque la precipitación excede, en su orden, una, dos o tres veces a la evapotranspiración potencial (demanda evapotranspirativa de la atmósfera). Dichas unidades hidrológicas forman agrupaciones distribuidas principalmente en las partes de pie de monte y laderas expuestas a las corrientes de humedad y precipitaciones en norte y suroeste del país. En tal sentido pueden considerarse sitios prioritarios en términos de

captación hidrológica ya que el balance hídrico atmosférico determina los valores más altos de disponibilidad hídrica. Por ejemplo, estos sitios se caracterizan por precipitaciones mayores a 2,000 mm al año y los ecosistemas consumen 900 mm o menos de agua, es decir, existe un excedente de más 1,000 mm disponibles para ser ingresados a los ecosistemas terrestres y de agua dulce.

Las microcuencas representadas de color azul totalizan 730 en todo el país y se caracterizan por presentar los máximos valores de disponibilidad, es decir una relación de evapotranspiración/precipitación menor a 0.5. Dichos valores indican que la precipitación es mayor al doble de la evapotranspiración potencial. Geográficamente destacan las regiones fisiográficas e hidrológicas de Tierras altas sedimentarias y algunos sitios de píe de monte y altiplano de las Tierras altas volcánicas. Los valores máximos de disponibilidad hídrica se ubican en la parte norte de las montañas de los Cuchumatanes en oeste de Guatemala. Contrastantemente las microcuencas con valores más bajos en cuanto a balances hídricos atmosféricos y disponibilidad hídrica son aquellos con valores altos de evapotranspiración potencial y relativamente bajos de precipitación. Estos están representados con colores naranja y la relación ETP/precipitación superior a 1, es decir se marcan déficits hídricos considerables. Están distribuidos geográficamente en el oriente y norte de Guatemala.

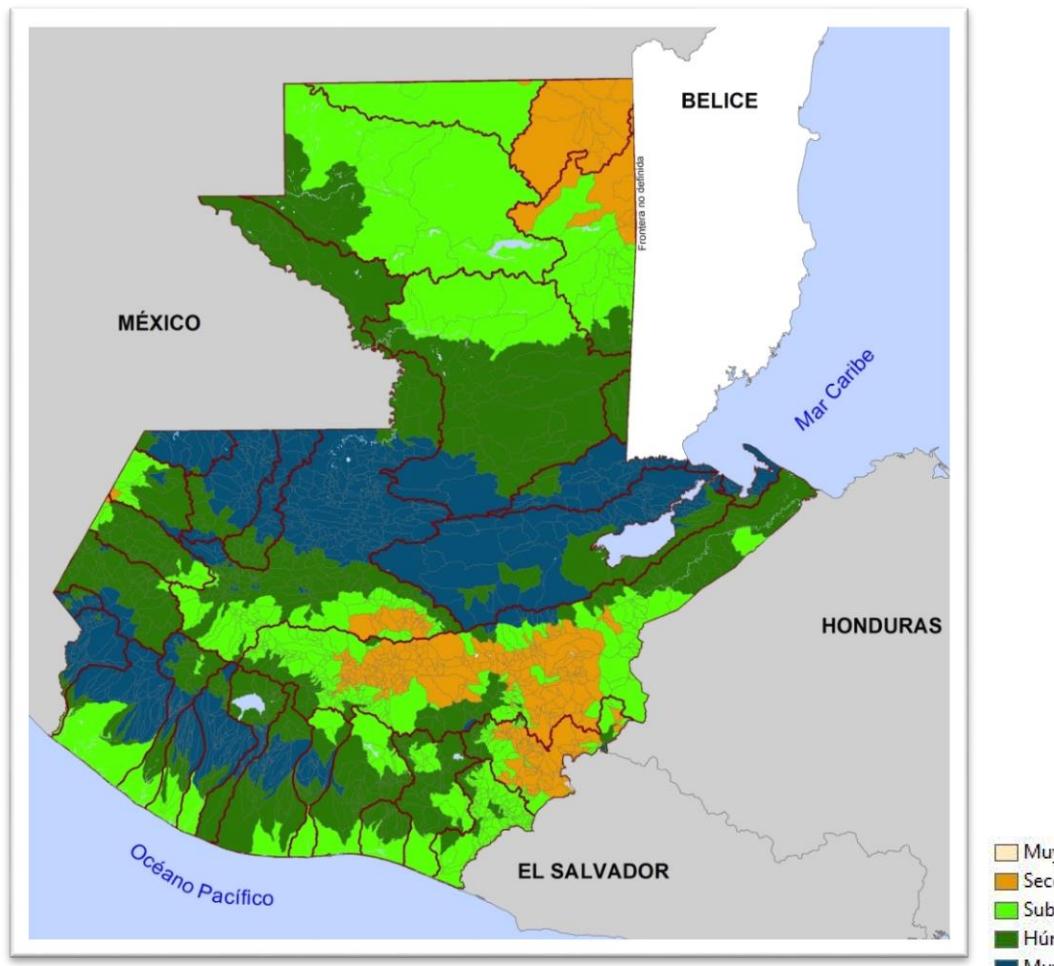


Figura 48. Indicador 1.1. Balance hídrico atmosférico (relación evapotranspiración potencial / precipitación) a escala de microcuenca.

Siguiendo el mismo patrón anterior, en color azul, se presentan las unidades hidrológicas con mayores valores de captación y regulación hidrológica de largo plazo (anual). En este caso, para el segundo indicador (1.2), la recarga hídrica anual a escala de cuenca, son aquellas con valores mayores a 400 mm. Estas unidades se distribuyen principalmente en las cuencas de la vertiente Pacífico, especialmente centro y occidente del país. Las unidades hidrológicas intermedias, entre 200 y 400 mm de recarga hídrica anual se distribuyen de manera complementaria a las anteriores en la regiones fisiográficas de tierras altas sedimentarias y vertiente del pacífico (Figura 10).

En contraste las cuencas con valores más bajos de recarga hídrica (menores a 200 mm) se distribuyen en una faja central de Guatemala, destacando las cuencas Motagua, y Selegua. Asimismo estas cuencas se distribuyen, principalmente en el norte y oriente del País (Figura 10).

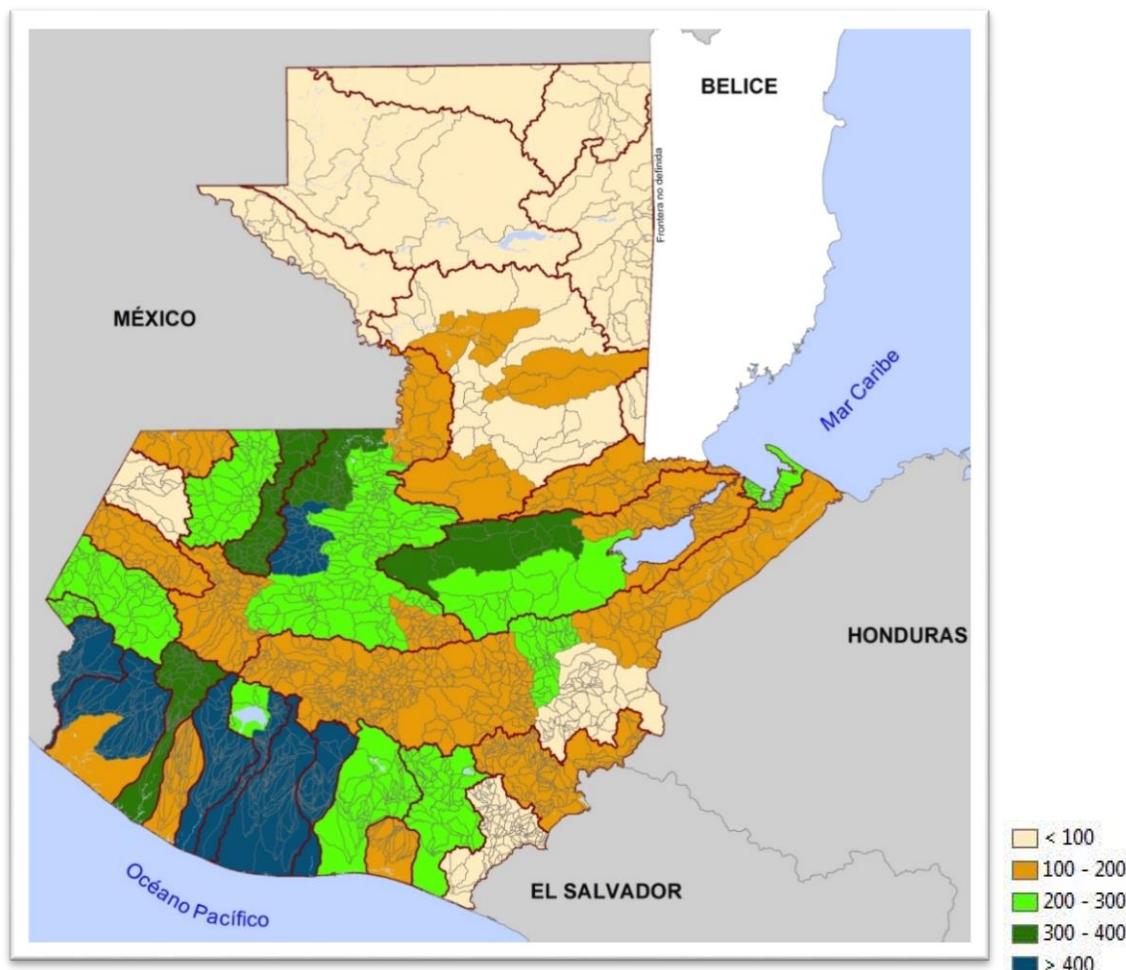


Figura 49. Indicador 1.2. Recarga hídrica profunda (mm/año) a escala de cuenca.

4.2.2 Componente 2. Regulación del flujo hídrico instantáneo.

Para determinar la capacidad de regulación del flujo hídrico instantáneo, directamente vinculado con las lluvias, a escala de microcuenca se empleó, por un lado, indicadores vinculados a la susceptibilidad a la erosión, Factor K, Factor R y Pendiente – Longitud del terreno. Esto de acuerdo a la ecuación universal de erosión hídrica del suelo, cuya metodología fue desarrollada por USDA. La evaluación aplicada a microcuenca de Guatemala fue generada a través de mapas realizados por MAGA. Complementariamente se determinó la proporción de las microcuenca que están ubicadas en la región fisiográfica (alta, media o baja) para evaluar su mayor o menor aporte en la regulación del flujo hídrico.

Bajo este contexto, en la Figura 11, se puede apreciar que los sitios más importantes para la regulación hidrológica, es decir que reúnen características de alta erosividad de la lluvia, alta erodabilidad de los suelos, altas pendientes con altas longitudes (color azul) se ubican de forma dominante en partes alta de cuenca en el Noroeste del país, al Norte de la cadena montañosa de los Cuchumatanes. Una segunda categoría (verde oscuro) se encuentran algunas microcuenca den la cadena volcánica y la parte norte en el departamento de Alta Verapaz.

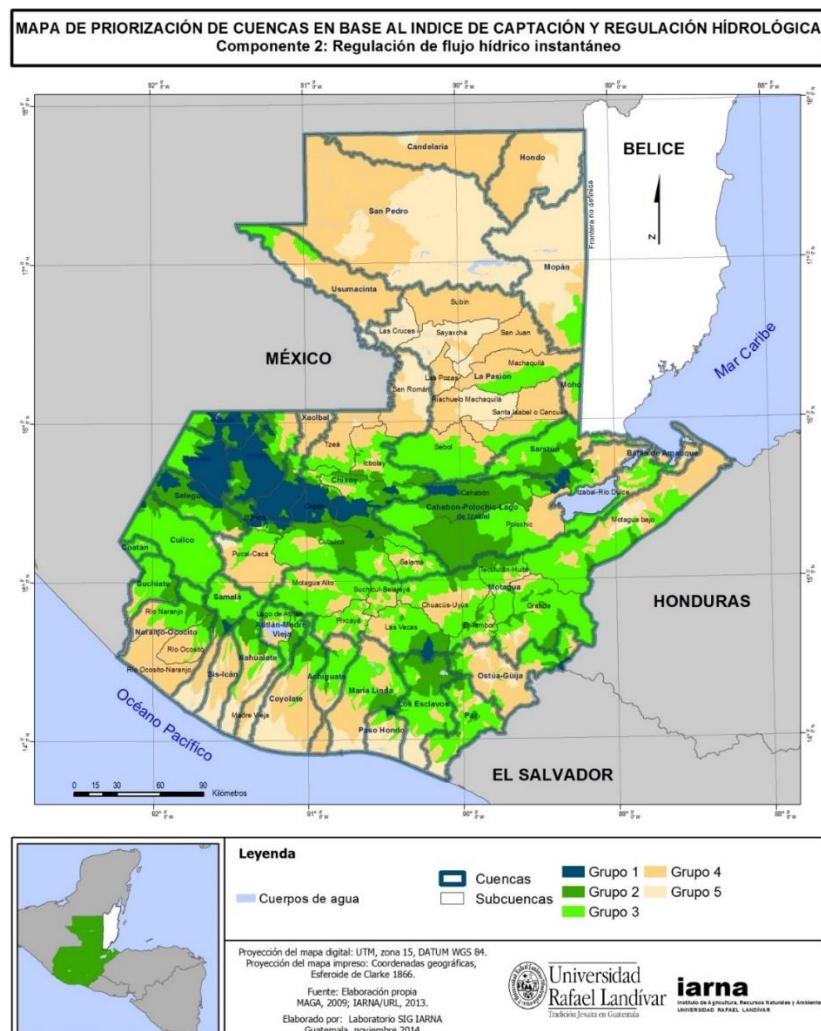


Figura 50. Integración de indicadores del Componente 2 para la integración del ICRH a escala de microcuenca.

A continuación se desagrega cada uno de los indicadores del componente 2. El primer indicador (2.1), erodabilidad de los suelos (Factor K), determina el grado de susceptibilidad de los suelos a ser erosionados durante eventos de lluvia. Por ejemplo un suelo arenoso y de estructura suelta tiene mayor susceptibilidad a erosionarse que otro suelo arcilloso y cohesionado. En la Figura 12 se muestra con color azul (mayor importancia para la regulación hidrológica) las microcuencas con valores del factor K mayor a 0.6. Los suelos con valores menores del Factor K son las categorías 0.15 a 0.3 y < de 0.15, los cuales están representados en color naranja y se ubican principalmente en la franja este - oeste en el centro del país. Los rangos intermedios en color verde están distribuidos de manera dispersa en el resto del país.

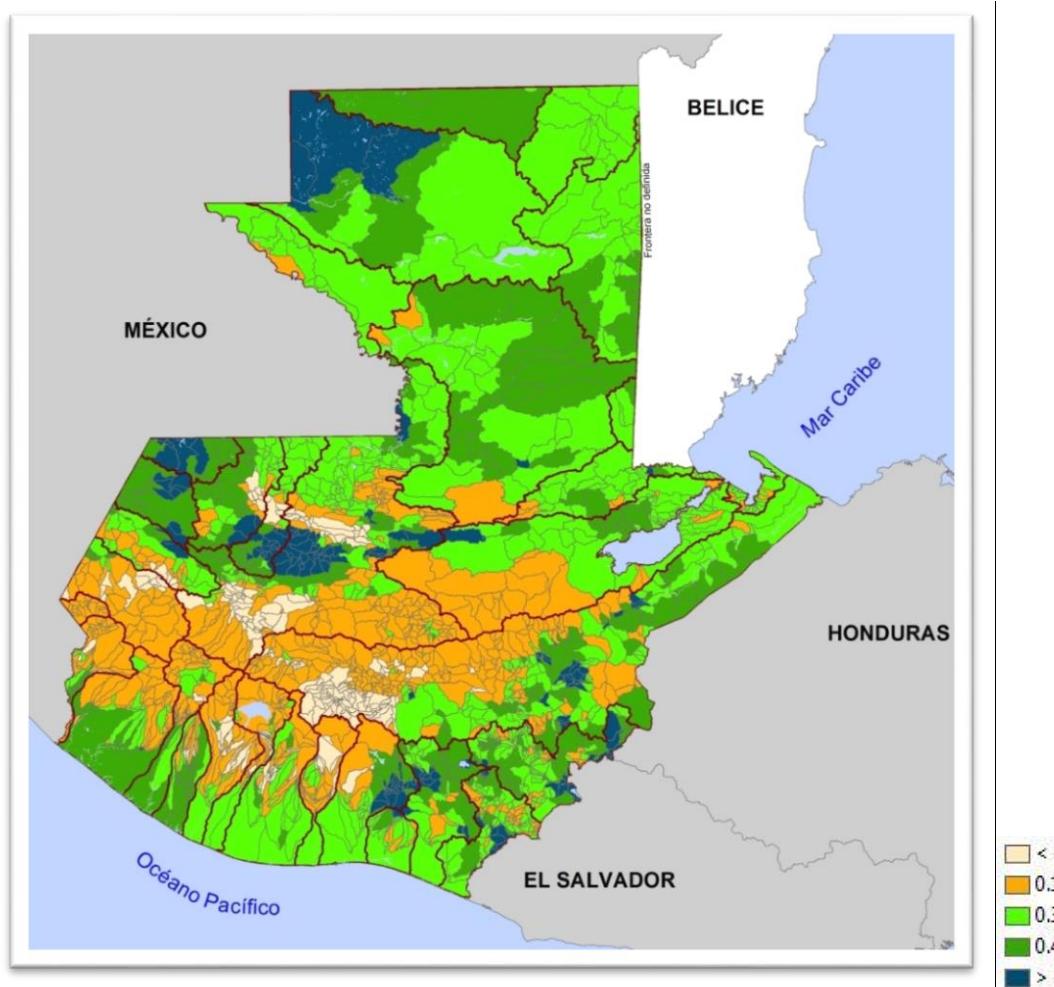


Figura 51. Indicador 2.1. Erodabilidad de los suelos (factor K) promedio a escala de microcuenca.

El Factor R determina el potencial que tiene la lluvia de generar erosión, esto de acuerdo a las propiedades de la misma. Por ejemplo los sitios afectados con mayores cantidades, altas frecuencias y altas intensidades de lluvia son más propensos a la erosión que sitios con lluvias escasas y de bajas intensidades.

En la Figura 13 se presenta en color azul las microcuencas con valores más altos, > 520, del factor R. Estas se distribuyen, principalmente, de manera dispersa en la parte alta de la cadena volcánica y en algunos sitios del noroccidente y nororiente de Guatemala. Microcuencas con categorías de valores intermedios, entre 260 y 520, se distribuyen

principalmente en las tierras altas sedimentarias del norte del país y planicie costera y tierras altas volcánicas, asimismo una pequeña extensión en la Sierra Lacandona, Petén.

Las microcuencas con valores más bajos de Factor R, menores a 260, se encuentran agrupadas en la costa del Pacífico, una amplia faja este – oeste en el centro del país y casi la totalidad del departamento de Petén.

Es importante mencionar que este factor es considerado como crítico para determinar sitios de alta susceptibilidad a la erosión.

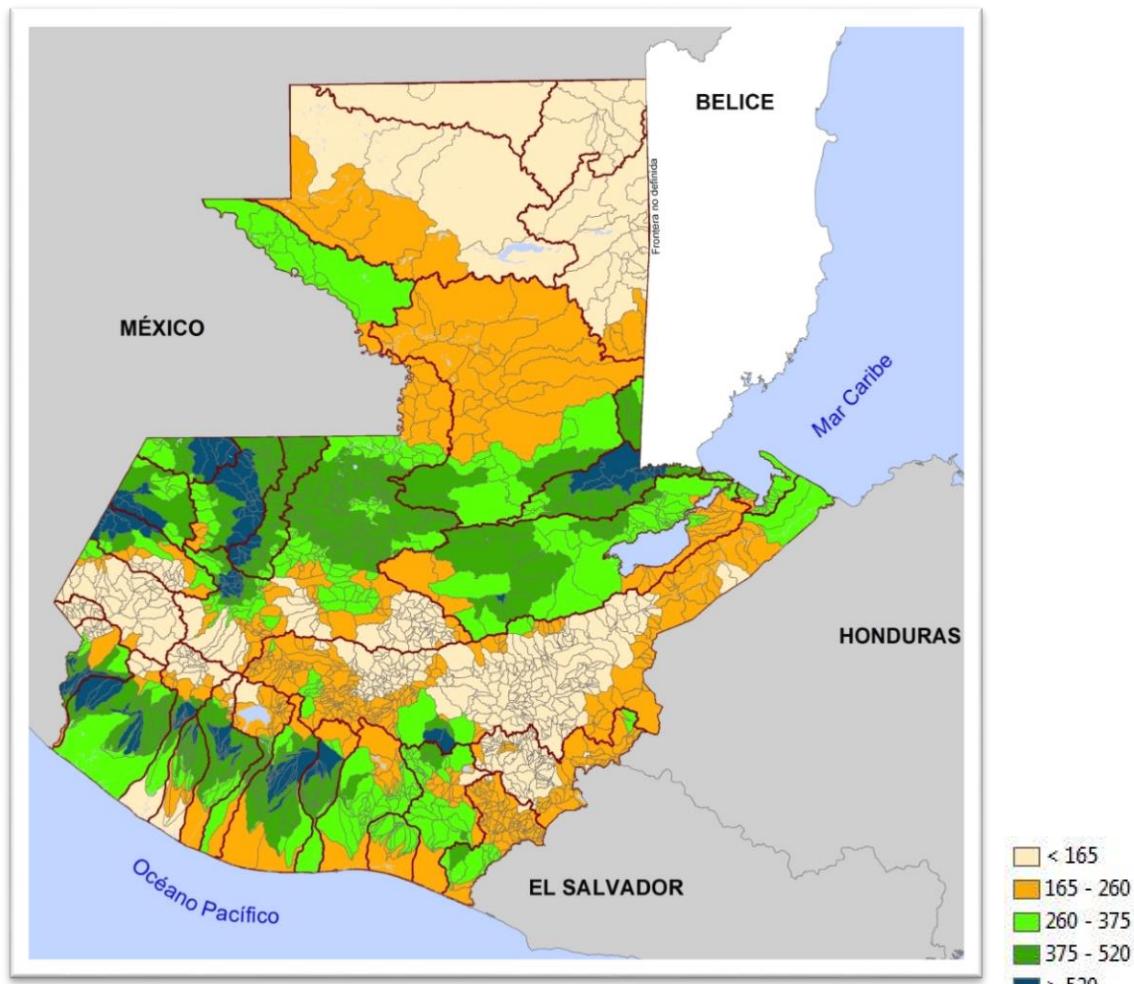


Figura 52. Indicador 2.2. Erosividad de la lluvia (factor R) promedio a escala de microcuenca.

El indicador Pendiente – longitud del terreno (Factor Ls), fue obtenido promediando los valores del mismo a escala de microcuenca. Este factor se considera que entre mayor pendiente y longitud tenga un terreno dado, mayor será su susceptibilidad a la erosión. En tal sentido, en la Figura 14, se muestran en color azul los sitios más importantes en función de este indicador con los valores mayores a 3. Dichas microcuencas están ubicadas principalmente en paisajes escarpados y laderas de montaña ubicados en las regiones altas o montañosas, tanto cristalinas, sedimentarias y volcánicas.

Las regiones intermedias, con valores del Factor LS entre 2 y 3 se encuentran ubicadas, principalmente, en el oriente del país y tierras altas volcánicas.

Finalmente, las regiones con menor pendiente están ubicadas en las planicies del norte sedimentarias, y del sur, en el pacífico volcánico de Guatemala, Factor Ls menor a 2. Es destacable que éste factor tiene valores bastante altos en la mayoría del país, lo cual está íntimamente relacionado con la condición montañosa y escarpada de la mayor parte central de Guatemala.

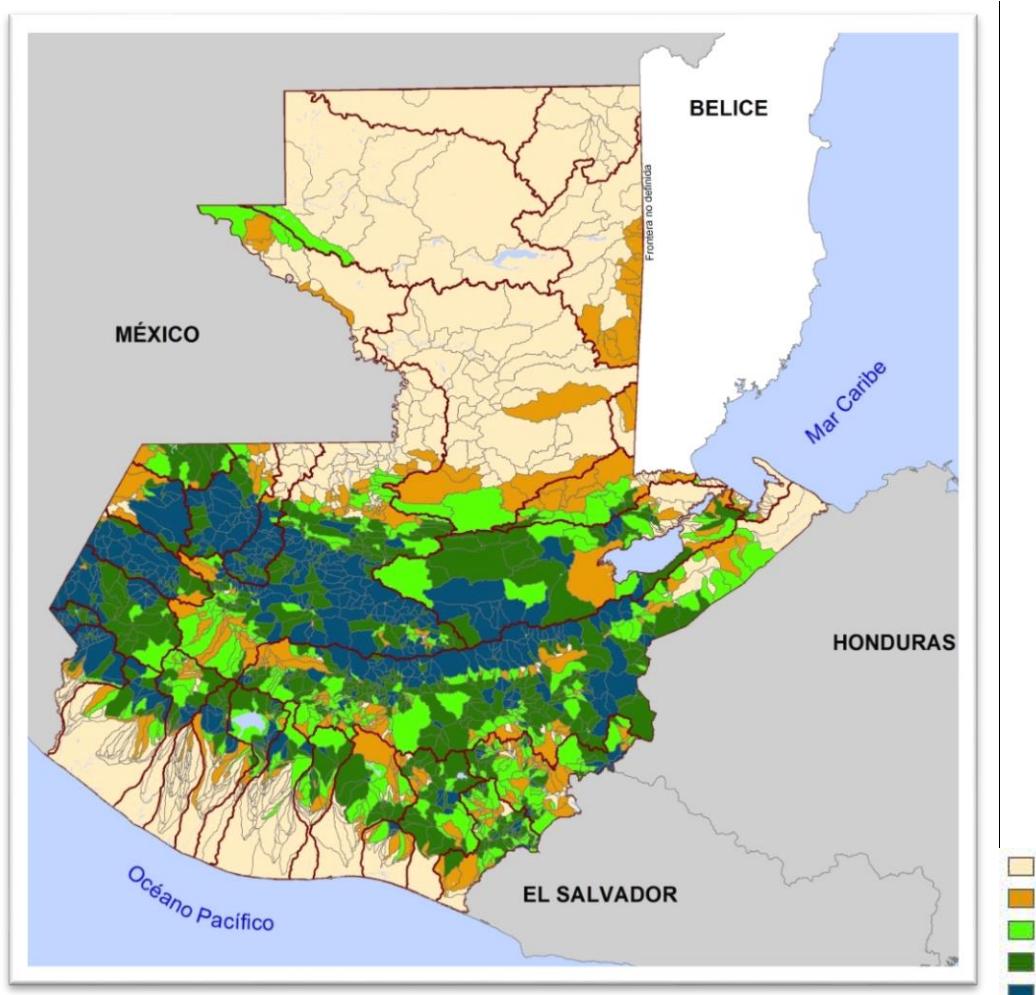


Figura 53. Indicador 2.3. Pendiente – longitud del terreno (factor Ls) promedio a escala de microcuenca.

Desde el punto de vista hidrológico y fisiográfico es ampliamente reconocido que las partes altas de las cuencas, ya sean escarpados montañosos o no, son sitios altamente importantes para la regulación del flujo hídrico instantáneo. Por tal motivo se definió también como un indicador importante para ser considerado. De acuerdo a la referencia utilizada (mapa de fisiografía de cuencas emanado por IARNA en 2006) se define como parte alta de la cuenca aquella región que altitudinalmente se encuentra en 20% superior y que además presenta pendientes en promedio mayores al 30%.

En la Figura 15 se puede apreciar una distribución de la categoría más importante para la regulación hidrológica, de acuerdo a un alto porcentaje, superior a 80%, de la cobertura de las microcuencas en las partes altas de las cuencas principales.

Es destacable que estos resultados también ilustran la importancia de la ubicación geográfica e hidrográfica de Guatemala, ya que evidencian que las principales cabeceras de ríos de la región mesoamericana están ubicadas en éste país. En Guatemala se regula el flujo hídrico de grandes regiones de México, Belice, Honduras y El Salvador.

Las categorías intermedias, con valores entre 40 y 80% de cobertura de las microcuencas en partes altas de las cuencas, se ubican dispersas en la parte central del país y de manera más o menos concéntrica a la categoría anteriormente descrita. Las microcuencas con valores más bajos para este indicador, de manera similar a la anterior, se ubican en las regiones de planicies bajas de Guatemala, de manera concéntrica a las categorías intermedias.

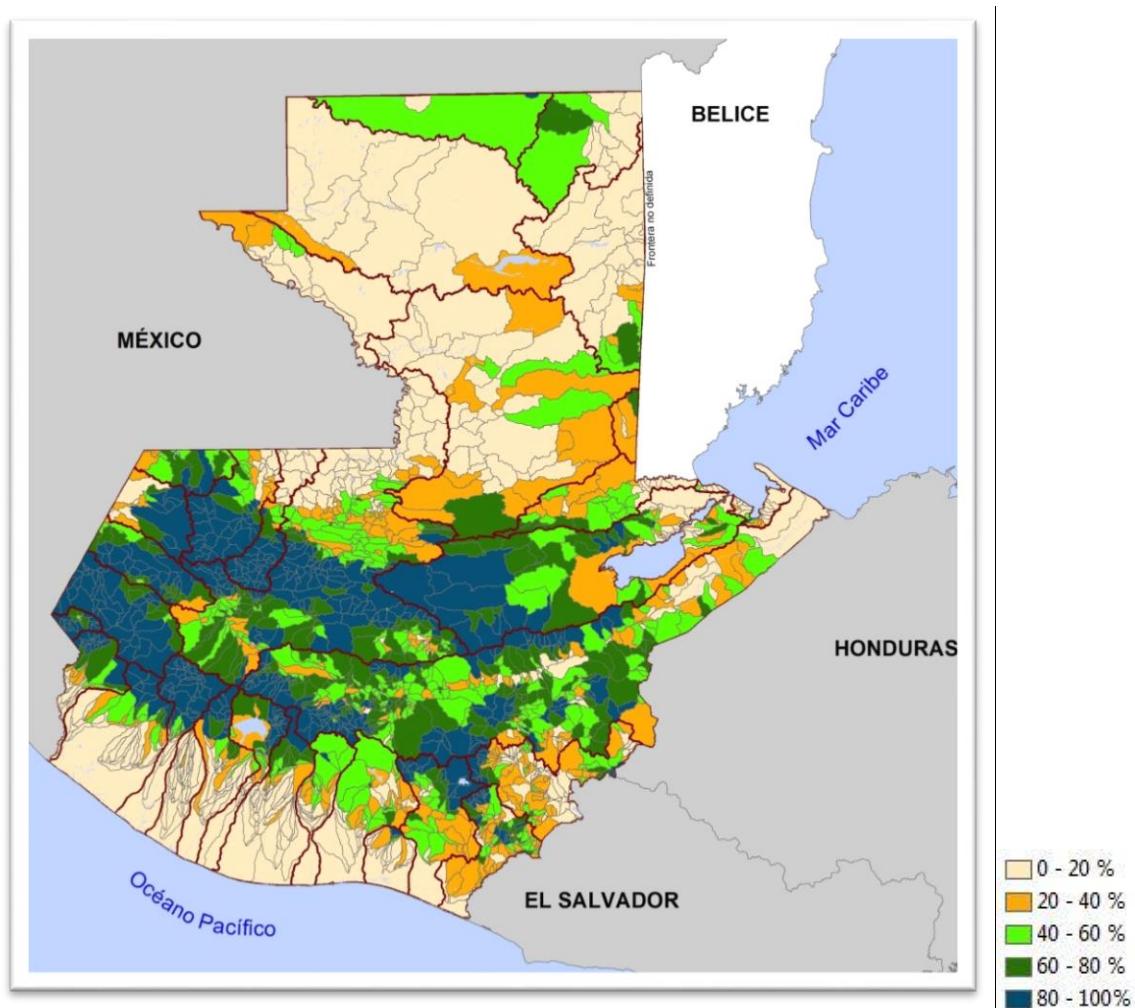


Figura 54. Indicador 2.4. Porcentaje de superficie en posición fisiográfica de regulación hidráulica (parte alta de cuenca).

4.2.3 Componente 3. Impacto socioambiental (servicios ecosistémicos y gestión de riesgo).

Este componente tiene como objetivo evaluar los impactos y servicios ecosistémicos hidrológicos generados por las microcuencas de Guatemala. En tal sentido se consideraron los indicadores de poblaciones expuestas a amenazas vinculadas con la captación y regulación hidrológica, tal como, población expuesta a inundaciones, sequías y deslizamientos. Asimismo se consideraron los beneficios en términos de demanda y capacidad instalada de almacenamiento hídrico (capacidad instalada de producción de energía en Megawatts (MW)). Por su importancia (color azul) destacan las cuencas Nahualate, María Linda y Los esclavos en el sur del país (Figura 16).

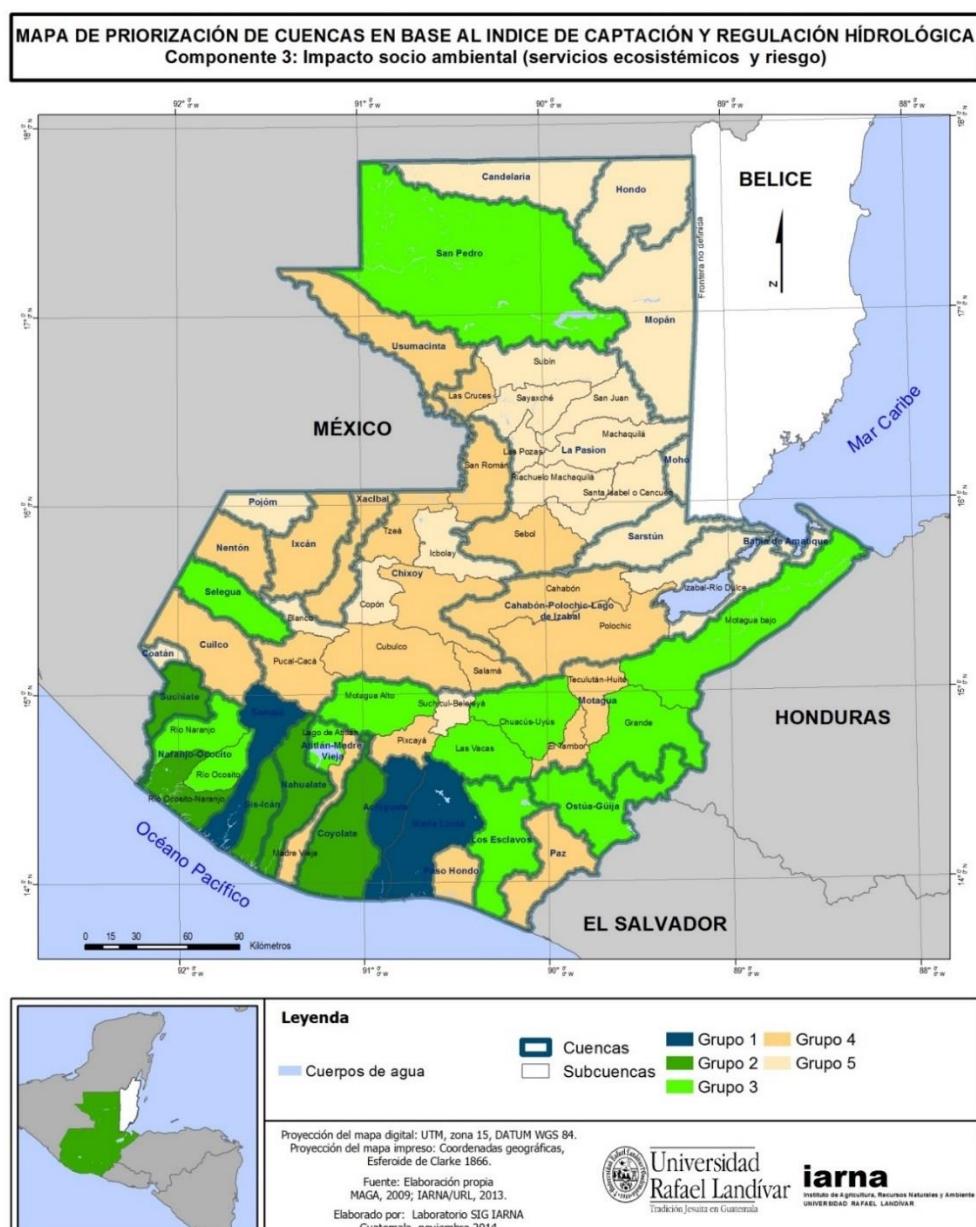


Figura 55. Integración de indicadores del Componente 3 para la integración del ICRH a escala de microcuenca.

Respecto a la población expuesta a inundaciones, se consideró que la escala más adecuada para el análisis es el de cuenca. De esta manera se determinó que las cuencas en donde mayor cantidad de población amenazada, mayor a 100,000 personas (Figura 16), se encuentra en las cuencas Motagua, en la vertiente caribe; María Linda, Achiguate, Samalá, Ocosito y partes bajas de Naranjo y Suchiate en la vertiente Pacífico. Valores intermedios de este indicador, entre 25,000 y 100,000 se encuentran principalmente en estas vertientes. Es destacable que en donde menor población amenazada aparece es en la vertiente del Golfo de México y en el norte de Petén.

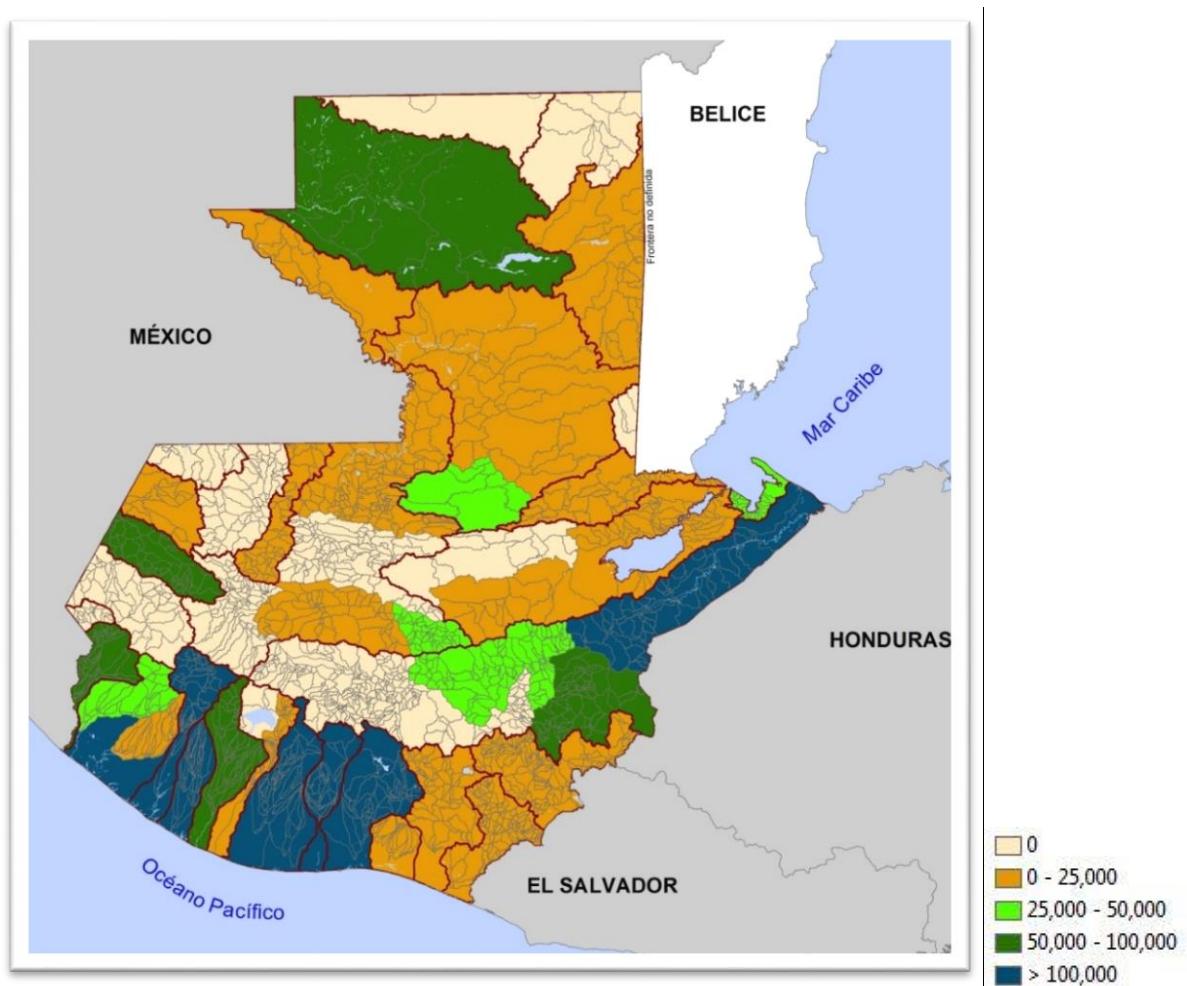


Figura 56. Indicador 3.1. Población expuesta a inundaciones a escala de cuenca.

Siguiendo con el mismo patrón de colores, se puede apreciar en la Figura 18, que las cuencas con la mayor cantidad de personas amenazadas por sequías, mostradas en color azul, se encuentran en la región oriental y sur del país, específicamente en las cuencas de Alto Motagua y Río Grande en el oriente del país (vertiente caribe). Además de las microcuencas de la parte alta de la cuenca Chixoy, ubicadas principalmente en Baja Verapaz, así como en las cuencas Samalá, María Linda y Achiguate de la vertiente del Pacífico. Todas estas cuencas muestran más de 100,000 personas amenazadas por las sequías. Todas juntas suman cerca de un millón de personas bajo esta amenaza hidroclimática.

Entonces, se puede deducir que la ubicación de las poblaciones con serias amenazas de sequía se encuentra en el oriente del país “valle del Motagua”, Valle de Samalá, Rabinal y Cubulco, y, algunos ecosistemas secos de la costa del Pacífico.

Valores intermedios y bajos se distribuyen de manera dispersa en el resto del país. Destaca con los valores más bajos cercanos a cero las microcuencas ubicadas en Petén de Izabal, Alta Verapaz, Quiché y Huehuetenango, así como ciertas regiones de la cuenca Atilán y departamento de Retalhuleu.

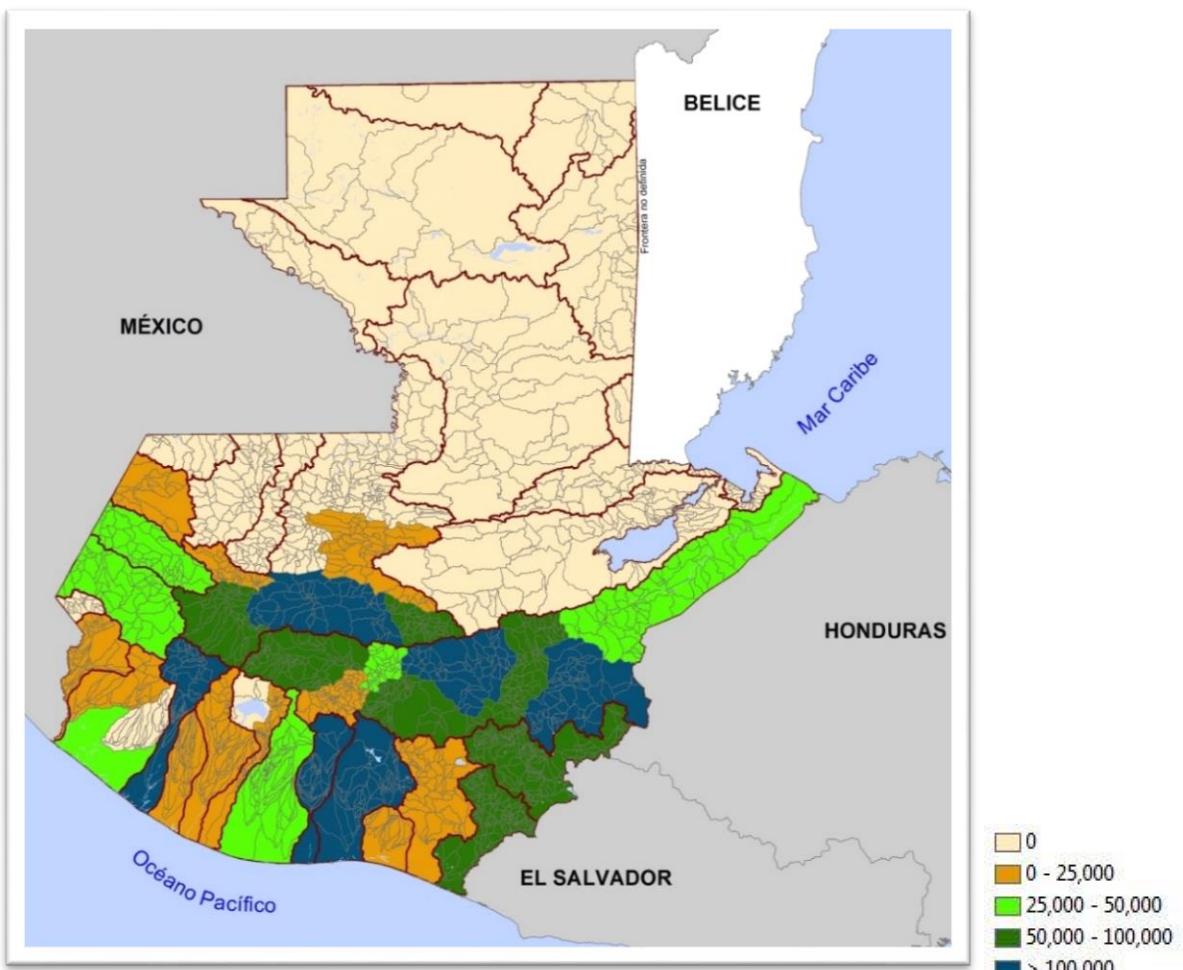


Figura 57. Indicador 3.2. . Población expuesta a sequías a escala de cuenca.

En cuanto a poblaciones amenazadas por deslizamientos, tal como se aprecia en la Figura 19, los valores más altos (color azul) se encuentran principalmente vinculadas a las regiones fisiográficas de Tierras altas volcánicas y algunas cuencas ubicadas en las Tierras altas sedimentarias, de acuerdo a la carga poblacional de las cuencas. Esta categoría agrupa más de dos millones de personas amenazadas.

Los valores intermedios, correspondientes a entre 25,000 y 100,000 de población amenazada se encuentran ubicados en las regiones fisiográficas montañosas de la parte central de Guatemala.

De manera contrastante las cuencas con menor cantidad de población amenazada (menos de 25,000) se encuentran principalmente en el Departamento de Petén, parte baja del río Motagua (vertiente caribe), río Cuijco (Golfo de México) y La Paz (Pacífico). Estas regiones están vinculadas a lluvias relativamente bajas y a las planicies del norte y sur del país.

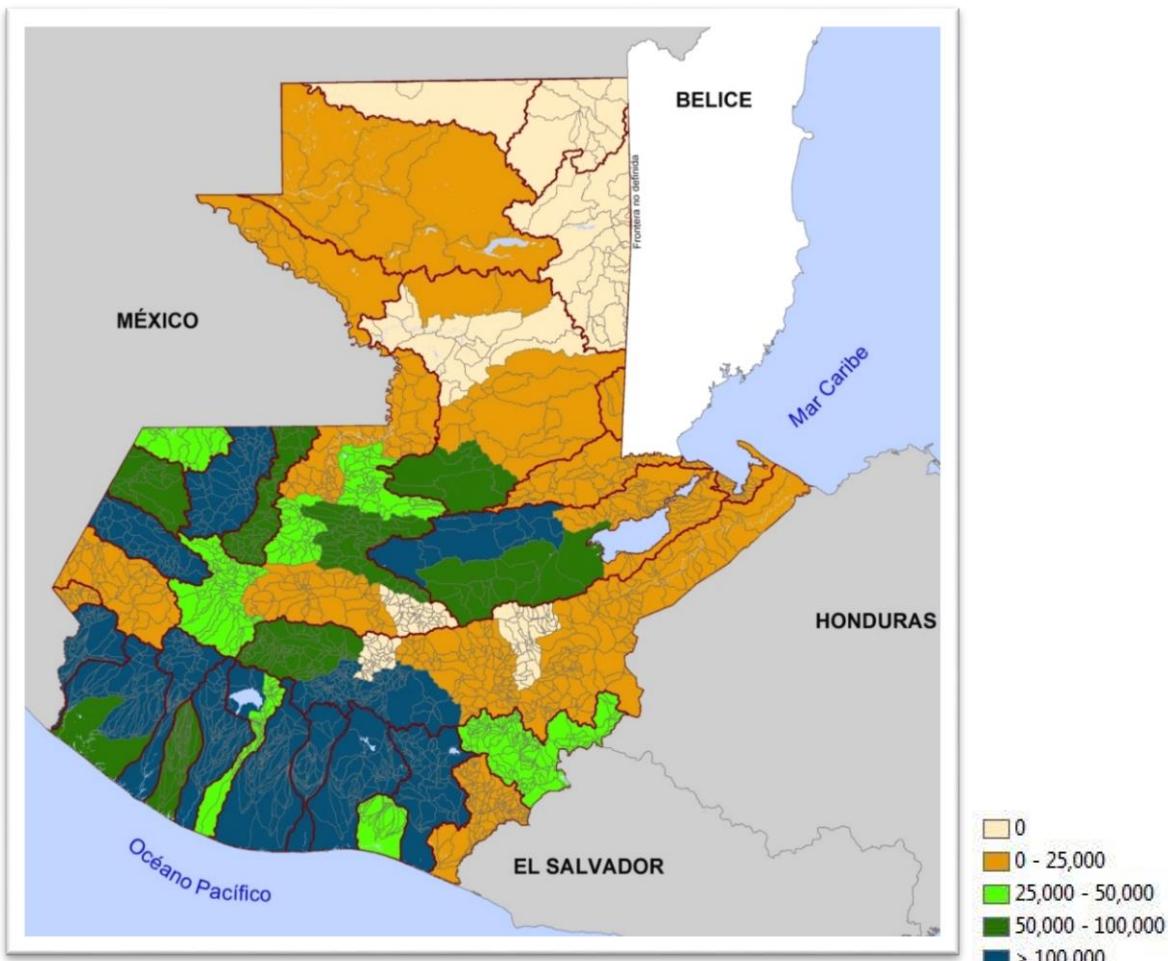


Figura 58. Indicador 3.3. . Población expuesta a deslizamientos a escala de cuenca.

Respecto al indicador de demanda de agua, el cual obviamente está vinculado a la carga poblacional de las cuencas, se tienen los siguientes resultados. Es importante mencionar que las demandas hídricas fueron estimadas en base a una demanda promedio de 17,000 metros cúbicos por persona por año, esto a escala de cuencas (Figura 20).

En tal sentido, en color azul se muestra con una demanda mayor de 25 millones de metros cúbicos, las cuencas de María Linda, Samalá y parte alta del Motagua, al norte del departamento de Guatemala.

Valores intermedios (colores verde oscuro y claro) entre 5 y 25 millones de metros cúbicos se muestran en las cuencas en el altiplano de Guatemala, sur y oriente del país. Y los valores más bajos de demanda hídrica (colores naranja) se encuentran en la mayor parte del norte de Alta Verapaz y Petén. En estos sitios las demandas son menores a 2.5 millones de metros cúbicos.

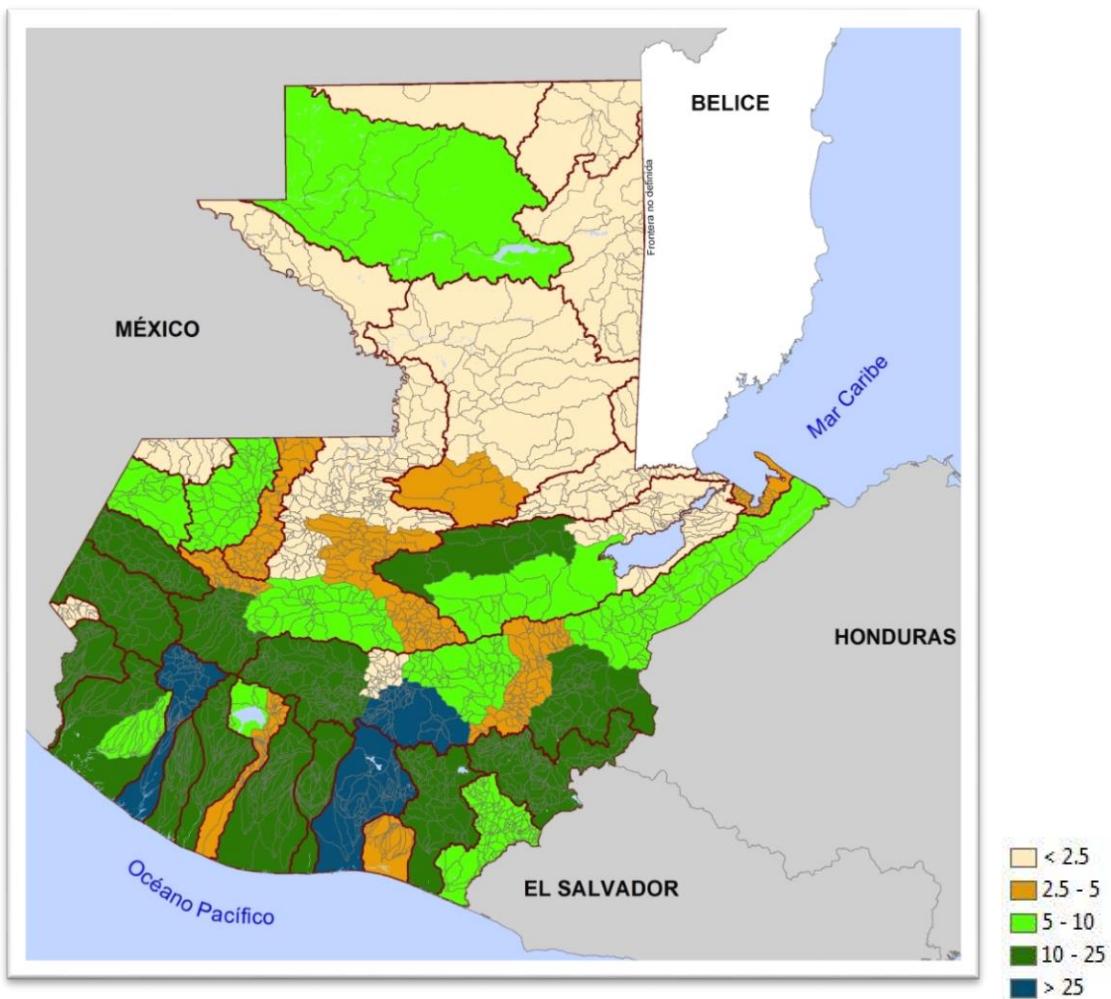


Figura 59. Indicador 3.4. Demanda de agua (millones de m³) a escala de cuenca.

El indicador de porcentaje de cobertura de cuerpos de agua naturales (3.5) (Figura 21), está vinculado directamente con la presencia de lagos y humedales, así como a la relación del tamaño del cuerpo de agua y de la cuenca.

Los resultados de la evaluación de cuencas de acuerdo a este indicador, destaca que la cuenca del lago Atitlán y la desembocadura del río La Pasión son los sitios con más del 2.5 % de superficie cubierta por el cuerpo de agua (color azul).

Con valores intermedios (entre 0.64 y 2.56 % de cobertura) destacan la mayor parte de las cuencas de la vertiente Pacífico, bajo Motagua y Polochic, Bajo Usumacinta y complejo lago Petén Itzá-San Pedro.

Todas las cuencas anteriores deben considerarse estratégicas por sí mismas, tanto desde el punto de vista hidrológico y ecológico como social, económico e institucional. Las interacciones sociedad-naturaleza en estas cuencas son críticas para la gestión de recursos hídricos disponibles y la conservación de la biodiversidad asociada.

Los valores más bajos (< a 0.645 de cobertura) en cuanto al almacenamiento natural de agua se encuentran, esparcidas por el resto del país (colores naranja y rosado claro). Estas cuencas también deben considerarse estratégicas en cuanto a la gestión de almacenamiento estratégico de recursos hídricos previendo un déficit creciente durante las épocas secas y múltiples actividades sociales y económicas vinculadas a cuerpos de agua.

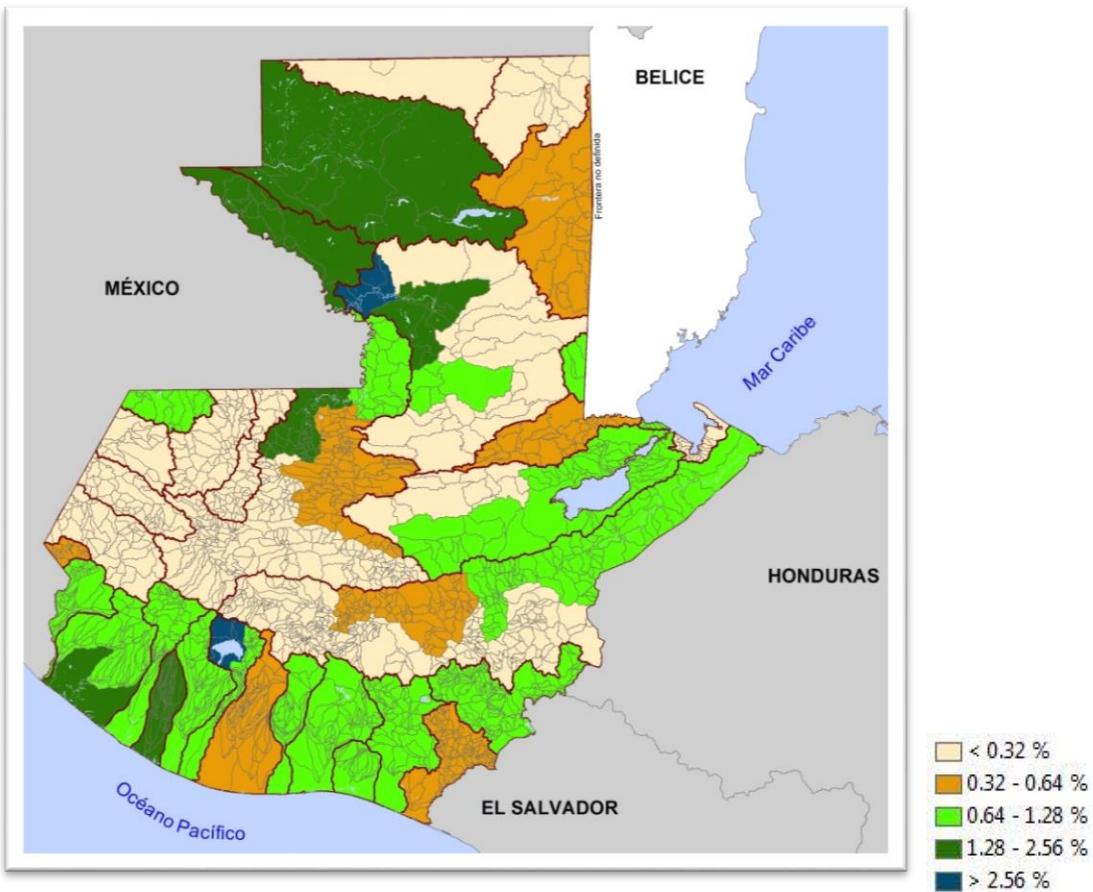


Figura 60. Indicador 3.5. Porcentaje de cobertura de cuerpos de agua naturales a escala de cuenca.

4.2.4 Componente 4. Gestión ambiental relacionada con la conservación y almacenamiento de agua.

Para la evaluación de este componente se utilizaron indicadores de la inversión y gestión institucional y económica para la conservación y almacenamiento hídrico, todo esto a escala de microcuenca. Estos indicadores pueden orientarnos acerca de los antecedentes, interés y factibilidad económica y social con los que se cuenta para lograr la conservación o restauración de las funciones hidrológicas de las microcuencas evaluadas. Como regiones y cuencas priorizadas destacan aquellas ya vinculadas al Sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas (SIGAP), por ejemplo, Cuenca del lago Atitlán (occidente), Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Río Dulce y Cerro San Gil (noreste), Reserva de la Biosfera Maya (norte), Visí Cabá (noroccidente) (Figura 22).

MAPA DE PRIORIZACIÓN DE CUENCAS EN BASE AL INDICE DE CAPTACIÓN Y REGULACIÓN HÍDROLÓGICA
 Componente 4: Gestión ambiental relacionada con conservación y almacenamiento de agua

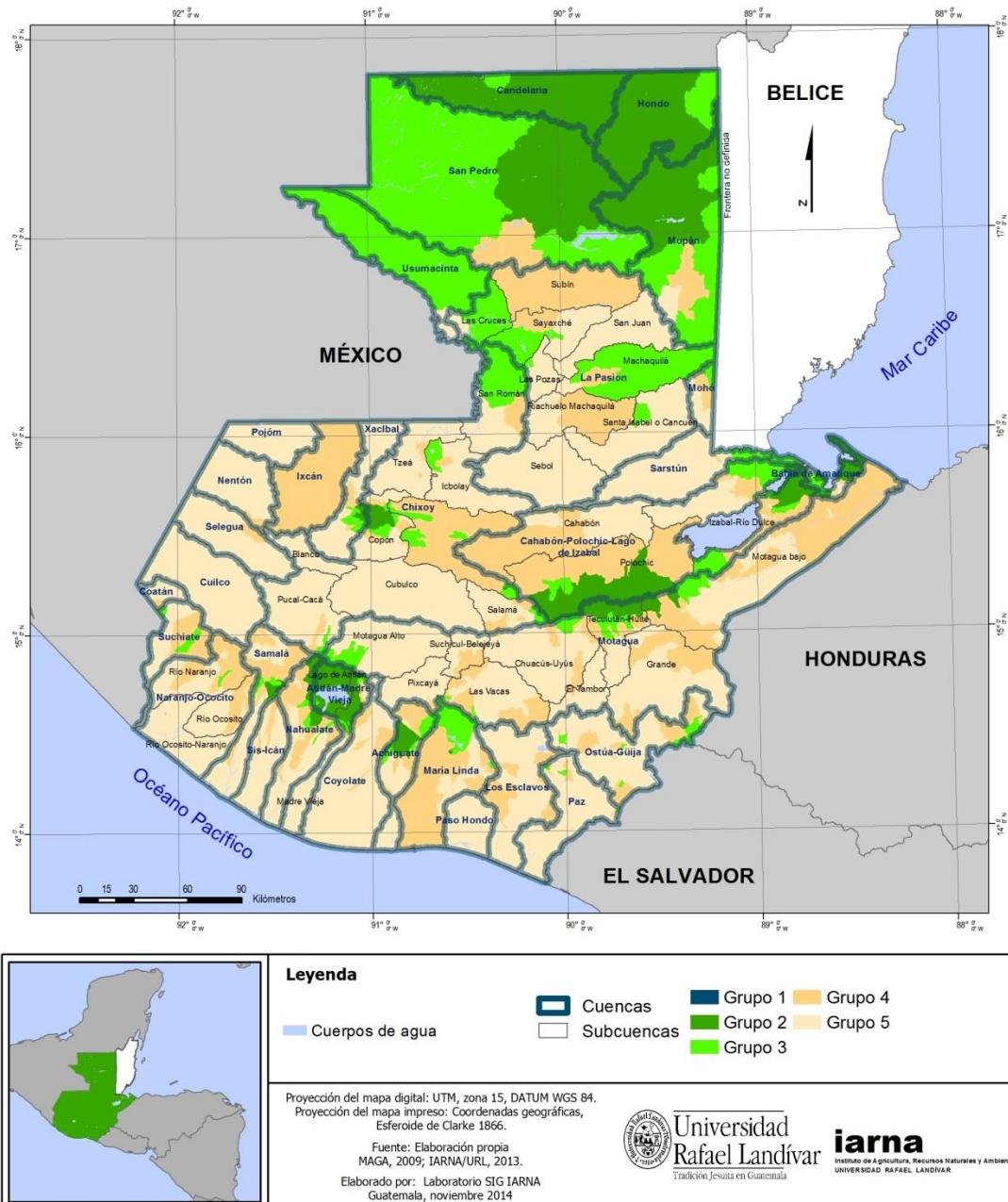


Figura 61. Integración de indicadores del Componente 4 para la integración del ICRH a escala de microcuenca.

El primer indicador es el gasto municipal per cápita anual para la conservación (Figura 23). En términos generales la inversión municipal es bastante baja para todas las categorías. Sin embargo, en términos relativos destacan las microcuenca en las que existen valores altos de este indicador (color azul, con $>$ de Q 300 per cápita anual) aquellas ubicadas en la parte noreste de la Reserva de la Biosfera Maya y algunas microcuenca dispersas alrededor de los núcleos urbanos de la ciudad de Guatemala y Quetzaltenango y Panajachel. Con valores intermedios se encuentran algunas microcuenca en el norte de Petén y muy dispersas en la región central de Guatemala.

Es muy conspicua la categoría con valores muy bajos ($<$ a Q 50) de inversión municipal para la conservación, los cuales están generalizados en todo el país (colores naranja) cubriendo más del 80 % del territorio nacional.

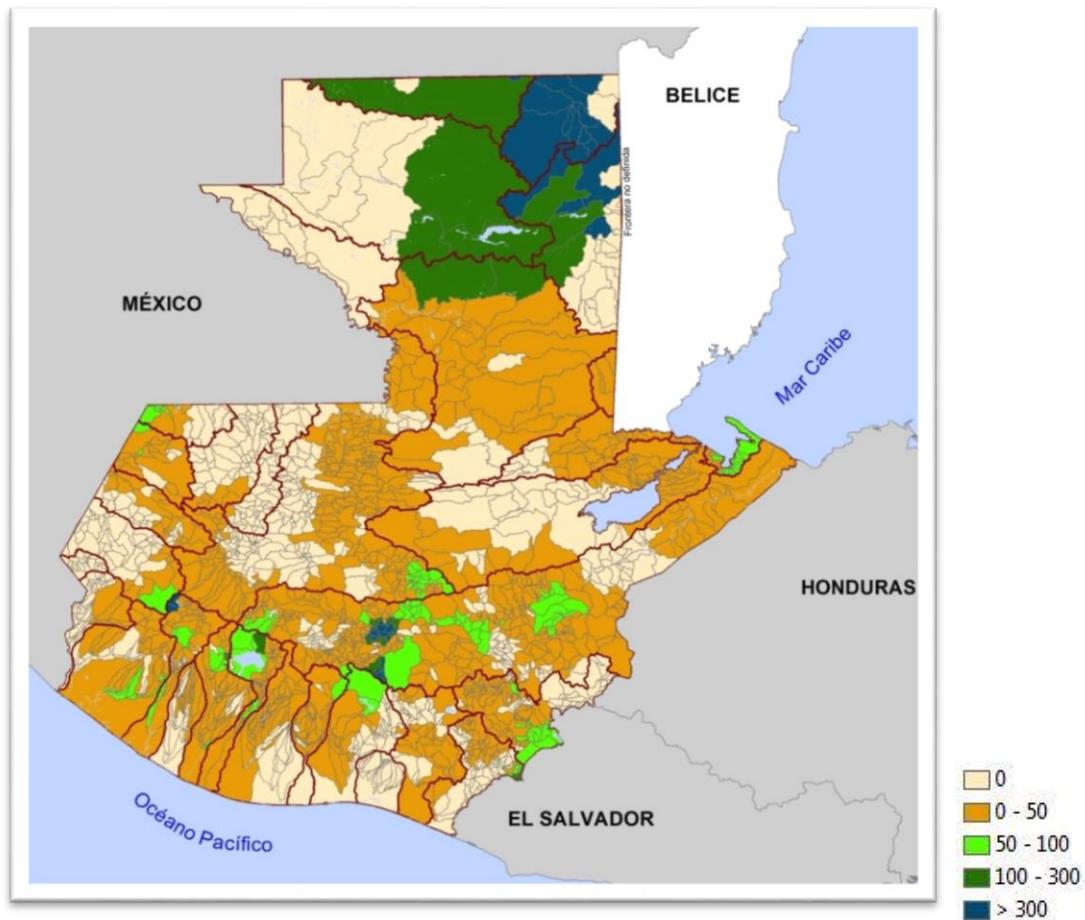


Figura 62. Indicador 4.1. Gasto municipal per cápita para conservación a escala de microcuenca.

Para el indicador (4.2) de porcentaje de la cobertura de las microcuenca en áreas protegidas pertenecientes al Sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas (SIGAP), se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 24).

En color azul destaca por presentar una cobertura mayor al 75% las agrupaciones de microcuenca ubicadas, en orden de extensión, la Reserva de la Biosfera Maya, Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Reserva de Usos Múltiples Cuenca del lago Atitlán, varias áreas protegidas de la costa atlántica (Izabal), Reserva de Biosfera Chajul, complejo ubicado

en la cadena volcánica, específicamente, volcanes de Agua, Fuego y Acatenango, área del trifinio y Parque Nacional Laguna Lachuá. De forma más o menos concéntrica se encuentran las microcuencas calificadas con valores intermedios (entre 25 y 75% de cobertura de AP).

Con valores muy bajos (<25%) se encuentran las microcuencas distribuidas en el resto del país, especialmente en el norte de Huhuetenango y parte central del país. Es evidente que existen cabeceras de cuencas que presentan muy pocas o ninguna microcuenca con regímenes mínimos de conservación (áreas protegidas). Por su importancia destacan las partes altas de cuenca del Chixoy, La Pasión y Cuijito (vertiente Golfo de México), Motagua (Caribe), y Los Esclavos (Pacífico).

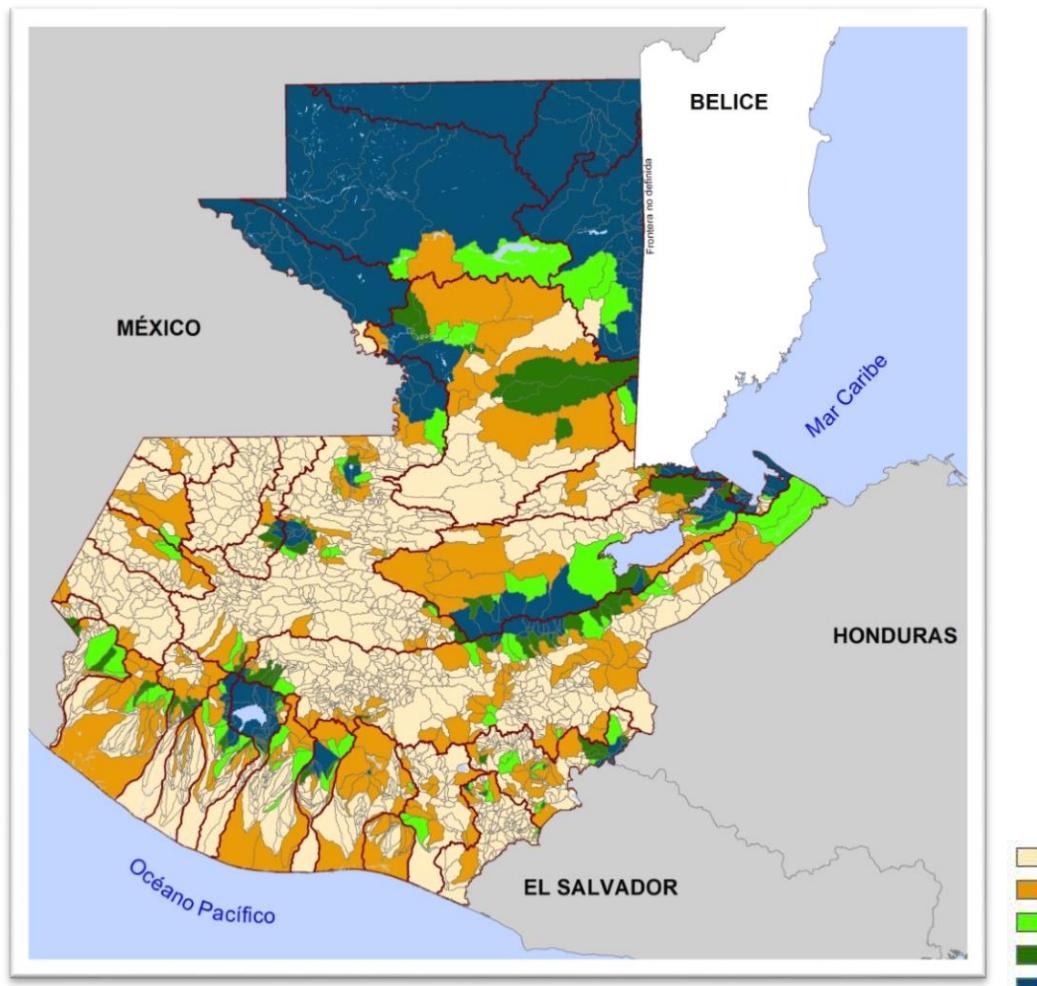


Figura 63. Indicador 4.2. Porcentaje de cobertura de áreas protegidas a escala de microcuenca.

El tercer indicador (4.3) de este componente evaluó la existencia de obras de almacenamiento de recursos hídricos en general, sin embargo, se presentó el hallazgo que la generación energética es la única actividad que promueve inversión significativa en este tipo de infraestructura. En tal sentido se obtuvo la capacidad autorizada/installada de Megawatts (MW) a escala de cuenca. Los valores más altos para este indicador se muestran en aquellas unidades hidrológicas vinculadas al embalse del río Chixoy y el río Copón con una capacidad instalada superior a 300 MW (Figura 25).

Con valores en el rango de entre 100 y 300 MW se encuentran las cuencas María Linda y Cahabón. Con valores entre 50 y 100 MW se encuentran cuencas Samalá, Polochic, Ixcán y otras microcuencas vinculadas al embalse Chixoy.

Se obtuvo otra categoría que agrupa a más de 12 cuencas con un rango de capacidad instalada de entre cerca de 0 y 50 MW. El resto del país se encuentra sin capacidad instalada que esté formalmente registrada.

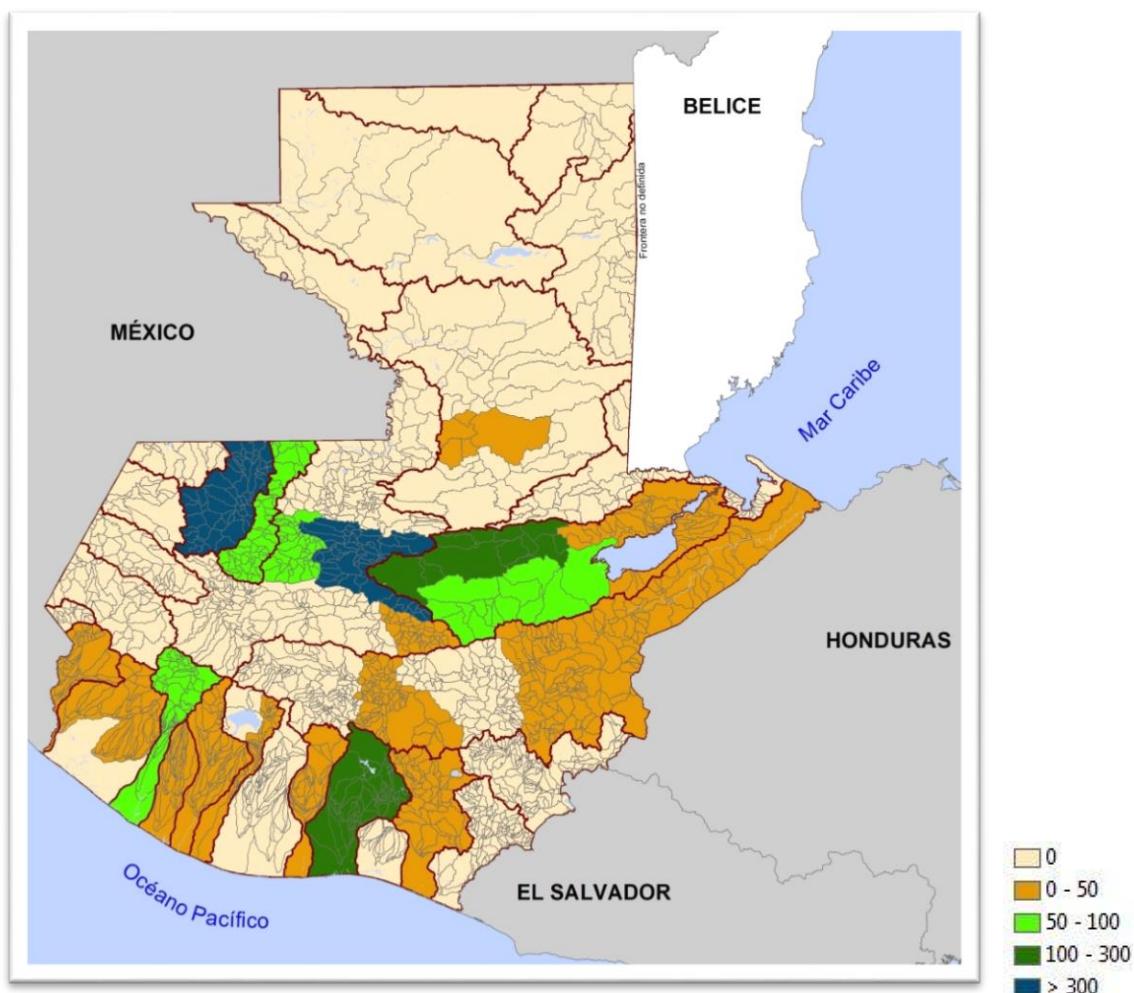


Figura 64. Indicador 4.3. Existencia de obras para almacenamiento de agua (capacidad instalada en MW) a escala de cuenca

4.2.5 Componente 5. Estado de los factores modificadores del flujo hídrico.

Para evaluar los factores condicionados por las actividades humanas que modifican el flujo y regulación hidrológica, se determinaron tres indicadores. El primero es cobertura forestal por microcuenca, (en porcentaje), el segundo es densidad de ecosistemas naturales (porcentaje con cobertura de bosque con densidad mayor al 80%) y el tercero conflictos de uso del suelo (porcentaje de cobertura con uso adecuado del suelo). Destacan para este componente las regiones donde se ubica la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Norte de la Reserva Biosfera Maya y Noroccidente Sierra Cuchumatanes (Figura 26).

MAPA DE PRIORIZACIÓN DE CUENCAS EN BASE AL INDICE DE CAPTACIÓN Y REGULACIÓN HÍDROLÓGICA
Componente 5: Factores modificadores del flujo hídrico natural

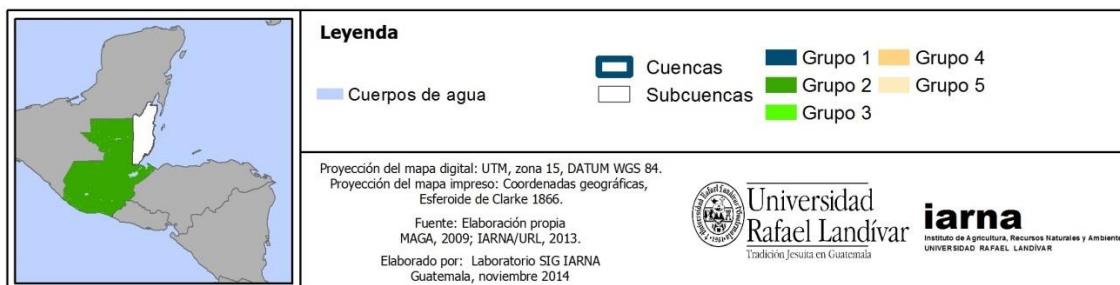
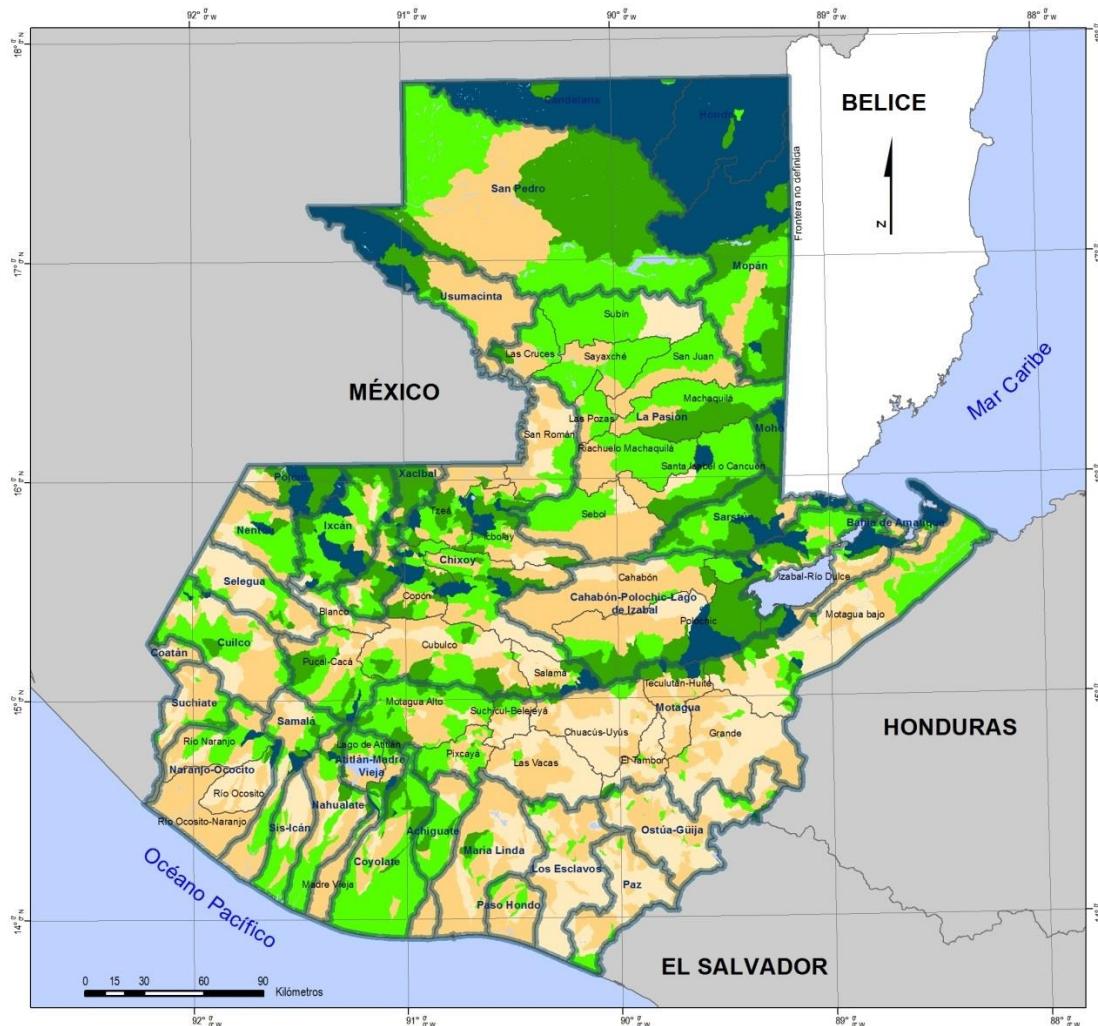


Figura 65. Integración de indicadores del Componente 5 para la integración del ICRH a escala de microcuenca.

Para el primer indicador sobresalen (Figura 27), en color azul (cobertura mayor al 80%), 22 microcuencas ubicadas en la Reserva de Biosfera Maya, y algunas dispersas, sobre todo en las Tierras altas sedimentarias, en o cercanas a la Franja Transversal del Norte (Norte de Quiché). Destaca también en esta clase el complejo de microcuencas Teculután-Huité, en la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas. El mayor número de microcuencas (cerca del 60%) están ubicadas de manera dispersa en todo el país con cobertura forestal entre el 20 y 80% (colores verdes).

Las microcuencas con menos del 20% de cobertura forestal se encuentran en la planicie volcánica de la costa sur y el oriente del país de manera concentrada. También se muestran algunas microcuencas dispersas en el occidente y norte de Guatemala.

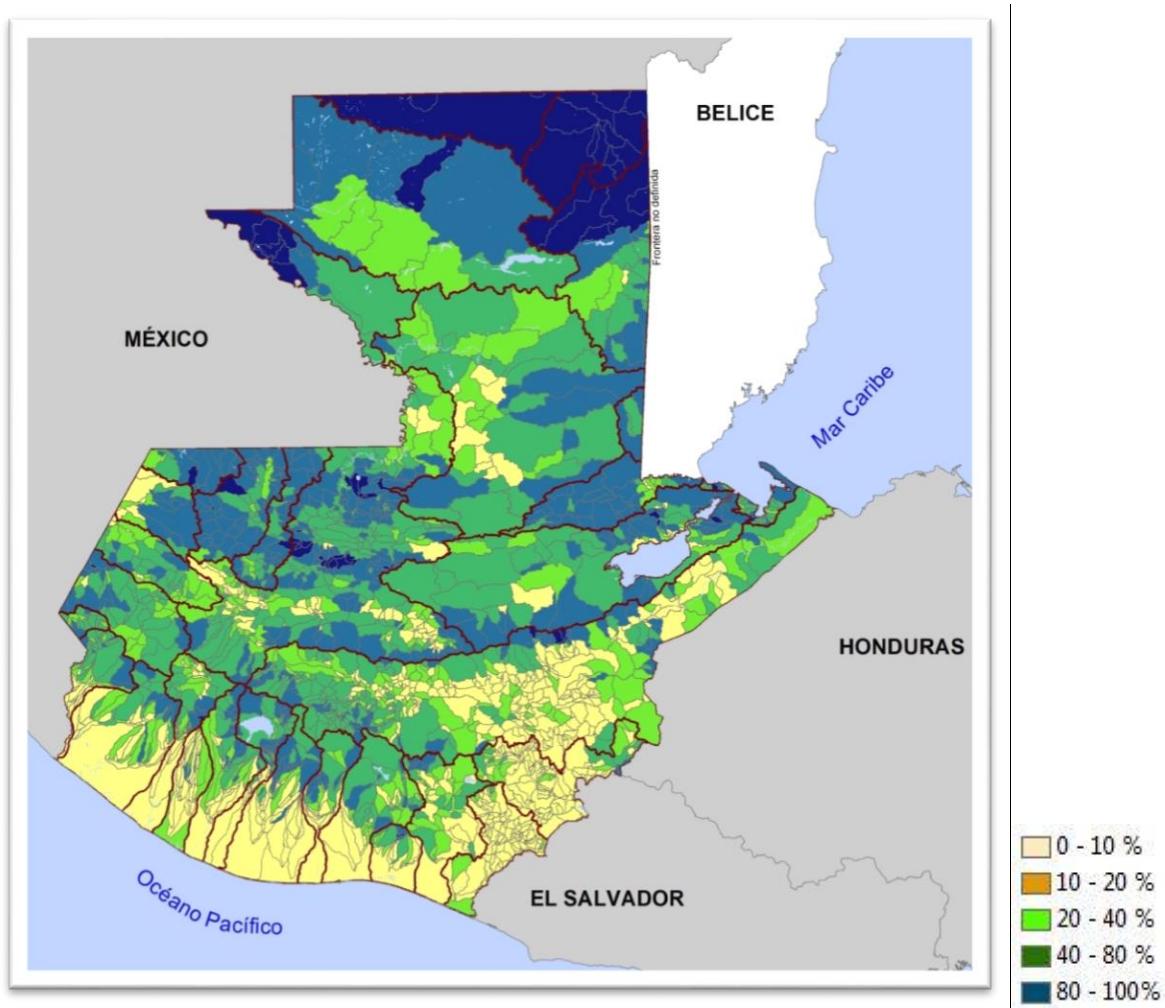


Figura 66. Indicador 5.1. Cobertura forestal a escala de microcuencas

Para el indicador de porcentaje de cobertura de bosque denso (bosque continuo con densidad mayor al 80%) se tiene los siguientes resultados. Los principales núcleos de la categoría de bosque denso mayor al 80% de la extensión de la microcuenca se observan en la reserva de la Biosfera Maya (color azul). En importancia le siguen otros núcleos (color verde oscuro) con un rango entre 60 y 80% de porcentaje de cobertura de bosque denso, los cuales se encuentran en o Reserva de la Biosfera Maya, Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas,

Parque Nacional Laguna Lachuá, Parque Nacional Sierra del Lacandón y otras áreas protegidas de la Reserva de la Biosfera Maya, Norte de Huehuetenango Y Chajul. Lo anterior evidencia la importancia del Sistema Guatemalteco de Áreas Protegidas para la conservación de las microcuenca con ecosistemas con alta densidad forestal (ver Figura 28).

Otras categorías que presentan un rango de bosque denso entre 10 y 20% (color naranja) y entre 20 y 40% (color verde claro) se distribuyen de manera más o menos concéntricas a las categorías anteriores y se encuentran dispersas por todo el país, aunque destacan conglomerados en la cadena de edificios volcánicos, norte de Huhuetenango, oriente de Izabal y norte y sureste de Petén.

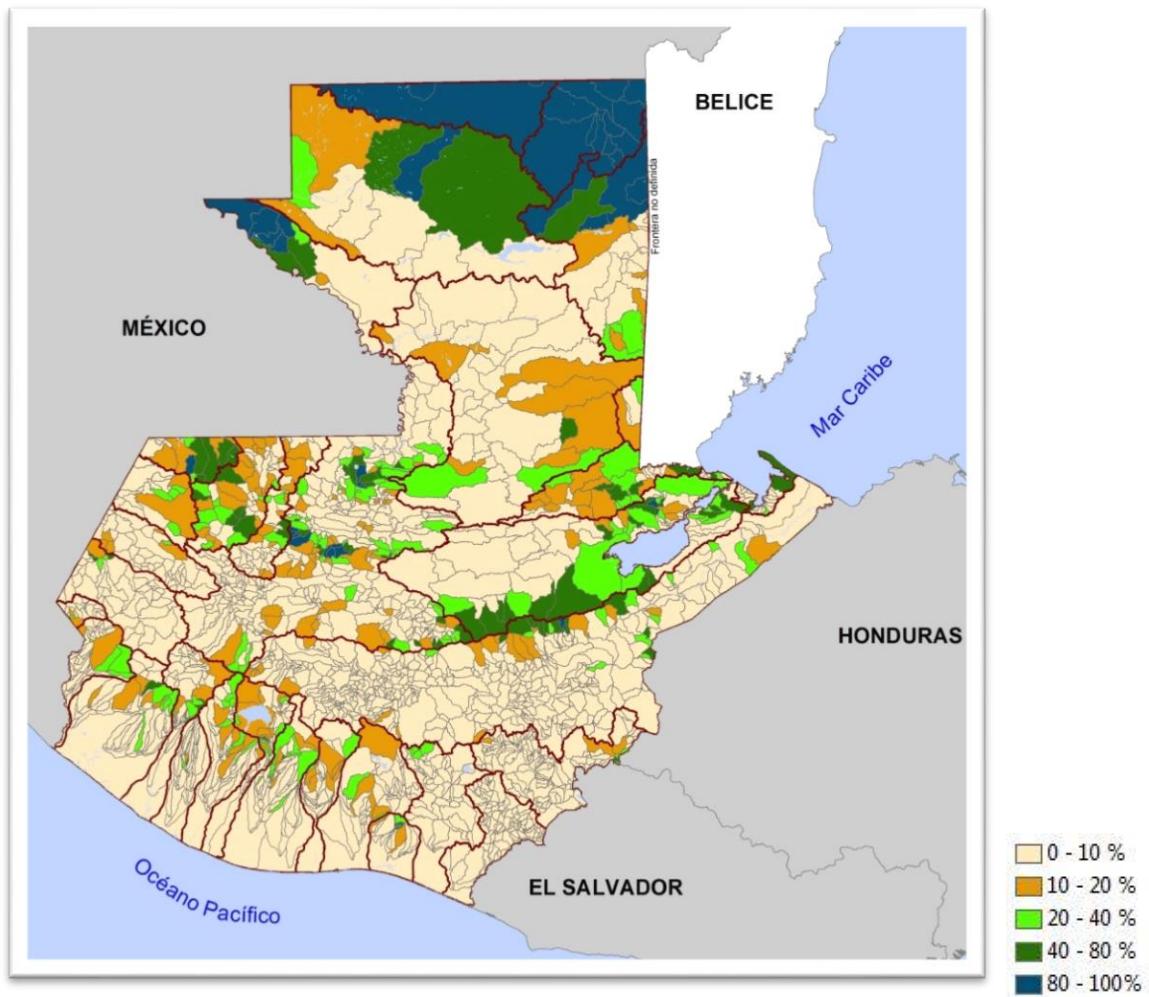


Figura 67. Indicador 5.2. Cobertura con bosques densos a escala de microcuenca.

Finalmente, respecto a la obtención del indicador de conflictos de uso del suelo (porcentaje de cobertura de la microcuenca con uso adecuado del suelo, de acuerdo a su capacidad máxima de uso) se tienen los siguientes resultados: Los valores más altos (color azul), categoría con más del 70% de la microcuenca con un uso adecuado, destacan agrupaciones ubicadas en la costa sur, reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, Norte de Quiché y Huehuetenango y Reserva de la Biosfera Maya. Para la segunda categoría, color verde oscuro

con un rango de entre 50 y 70% de uso adecuado, destaca que están dispersas en el norte del país, así como una franja en la divisoria de aguas de las cuencas y vertientes del Chixoy (Golfo de México) y Motagua (Caribe) y Atilán, Madre Vieja. Esta zona también alterna con algunas microcuencas de las categorías de entre 15 y 50% de uso adecuado. Es importante resaltar que esta zona puede considerarse como estratégica para promover el incremento del uso adecuado del suelo (Figura 29).

Las microcuencas con valores muy bajos, menores a 15% de un uso adecuado del suelo se encuentran dispersas por toda la geografía del país, sin embargo se observan con mayor frecuencia y continuidad en el oriente del país, occidente de Huhuetenango, microcuencas cercanas al embalse Chixoy y pie de monte de la cadena volcánica occidental.

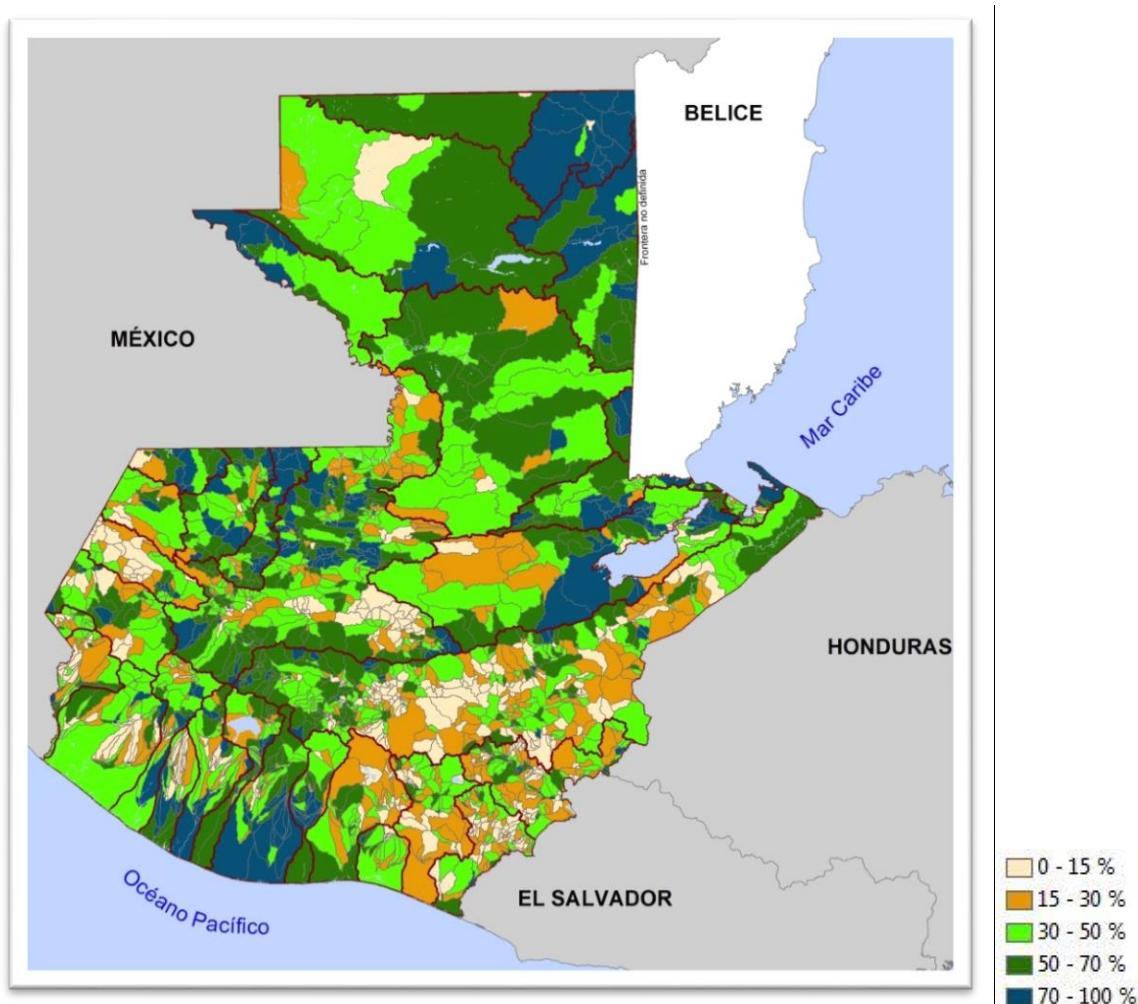


Figura 68. Indicador 5.3. Conflictos de uso suelo a escala de microcuenca.

4.3 Categorización de microcuencas de acuerdo a la obtención del índice de captación y regulación hidrológica ICRH

En términos generales las microcuencas analizadas para Guatemala son 2391 (Cuadro 7) con una extensión promedio aproximada de 4,500 ha. Cada una de las microcuencas fue calificada

utilizando como referente el ICRH ya descrito. En la Anexos 1 se pueden apreciar ejemplos de fichas utilizadas para la calificación de cada una de las microcuencas mediante el cálculo del ICRH.

Al contar con los ICRH de las 2,391 microcuencas analizadas para Guatemala, se ordenaron de menor a mayor y se graficaron (Figura 30). A continuación se clasificaron estos resultados, es decir, la definición de grupos homogéneos dentro de sí y heterogéneos entre sí, utilizando el método denominado “separación por quiebres naturales” (cambios bruscos “gradas” en el ordenamiento de los datos), el cual fue operado en sistemas de información geográfica. Se determinaron 5 categorías, las cuales se muestran en la misma figura.

De acuerdo a esta categorización se estableció su distribución geográfica considerando las tres vertientes de Guatemala (Cuadro 7 y Figura 31). La Categoría 1 de la priorización, es aquella con los valores más altos, es decir el ICRH con un valor superior a 75. Esta categoría únicamente la conforman 6 microcuencas abarcando el 0.1% del territorio nacional, únicamente se distribuyen en la vertiente del pacífico, específicamente están ubicadas en la cadena volcánica y cuentan con un tamaño promedio aproximado de 10,729 ha.

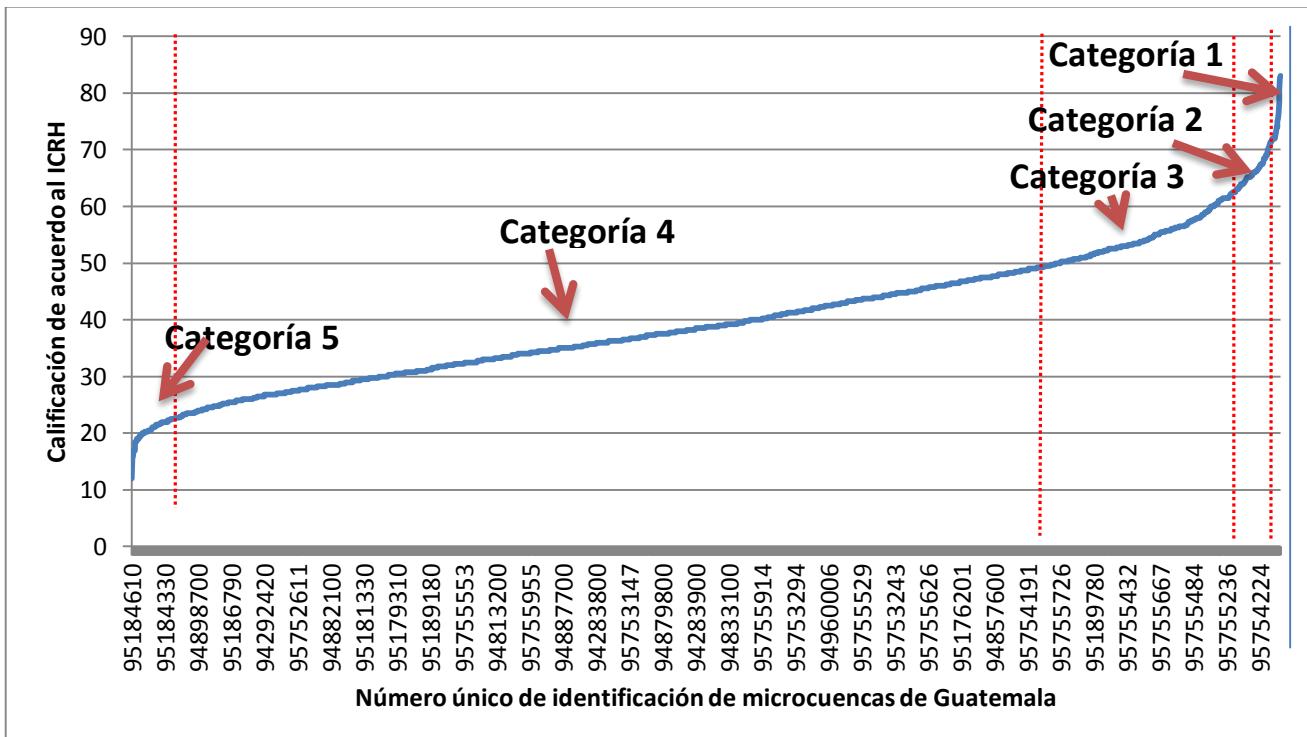


Figura 69. Visualización gráfica para la categorización de las microcuencas, de acuerdo al ICRH.

Cuadro 20. Resultados generales de la categorización de las microcuenca de Guatemala.

Categorías	Rango de ICRH	Área (ha)	Número de microcuenca	Área máxima de microcuenca (ha)	Área mínima de microcuenca (ha)	Promedio de área	Cobertura (%)	
Categoría 1	> 75	10,729	6	3,749	752	1,788	0.10	
Categoría 2	62.5 - 75	320,426	89	42,509	19	3,600	2.96	
Categoría 3	50 - 62.5	1,412,548	363	69,791	15	3,891	13.05	
Categoría 4	25 - 50	8,610,047	1,744	315,601	2	4,937	79.52	
Categoría 5	< 25	473,821	189	64,725	3	2,507	4.38	
Total general		10,827,572	2,391	315,601	2	4,528	100.00	
Categorías / vertiente		Rango de ICRH	Área (ha)	Número de microcuenca	Área máxima de microcuenca (ha)	Área mínima de microcuenca (ha)	Promedio de área	Cobertura (%)
Categoría 1	> 75	10,729	6	3,749	752	1,788	0.10	
Pacífico		10,729	6	3,749	752	1,788	0.10	
Categoría 2	62.5 - 75	320,426	89	42,509	19	3,600	2.96	
Caribe		119,080	14	42,509	380	8,506	1.10	
Golfo Mexico		57,020	22	10,989	286	2,592	0.53	
Pacífico		144,326	53	13,735	19	2,723	1.33	
Categoría 3	50 - 62.5	1,412,548	363	69,791	15	3,891	13.05	
Caribe		468,567	53	69,791	24	8,841	4.33	
Golfo Mexico		382,742	120	30,435	15	3,190	3.53	
Pacífico		561,239	190	31,013	28	2,954	5.18	
Categoría 4	25 - 50	8,610,047	1,744	315,601	2	4,937	79.52	
Caribe		2,585,889	588	114,085	7	4,398	23.88	
Golfo Mexico		4,403,509	595	315,601	7	7,401	40.67	
Pacífico		1,620,649	561	124,341	2	2,889	14.97	
Categoría 5	< 25	473,821	189	64,725	3	2,507	4.38	
Caribe		169,009	87	24,765	4	1,943	1.56	
Golfo Mexico		234,067	32	64,725	3	7,315	2.16	
Pacífico		70,745	70	7,128	12	1,011	0.65	
Total general		10,827,572	2,391	315,601	2	4,528	100.00	

MAPA DE PRIORIZACIÓN DE CUENCAS EN BASE AL INDICE DE CAPTACIÓN Y REGULACIÓN HÍDROLÓGICA

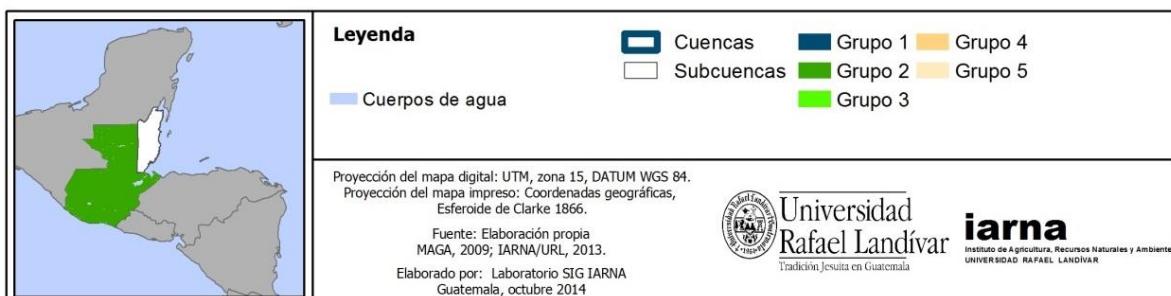
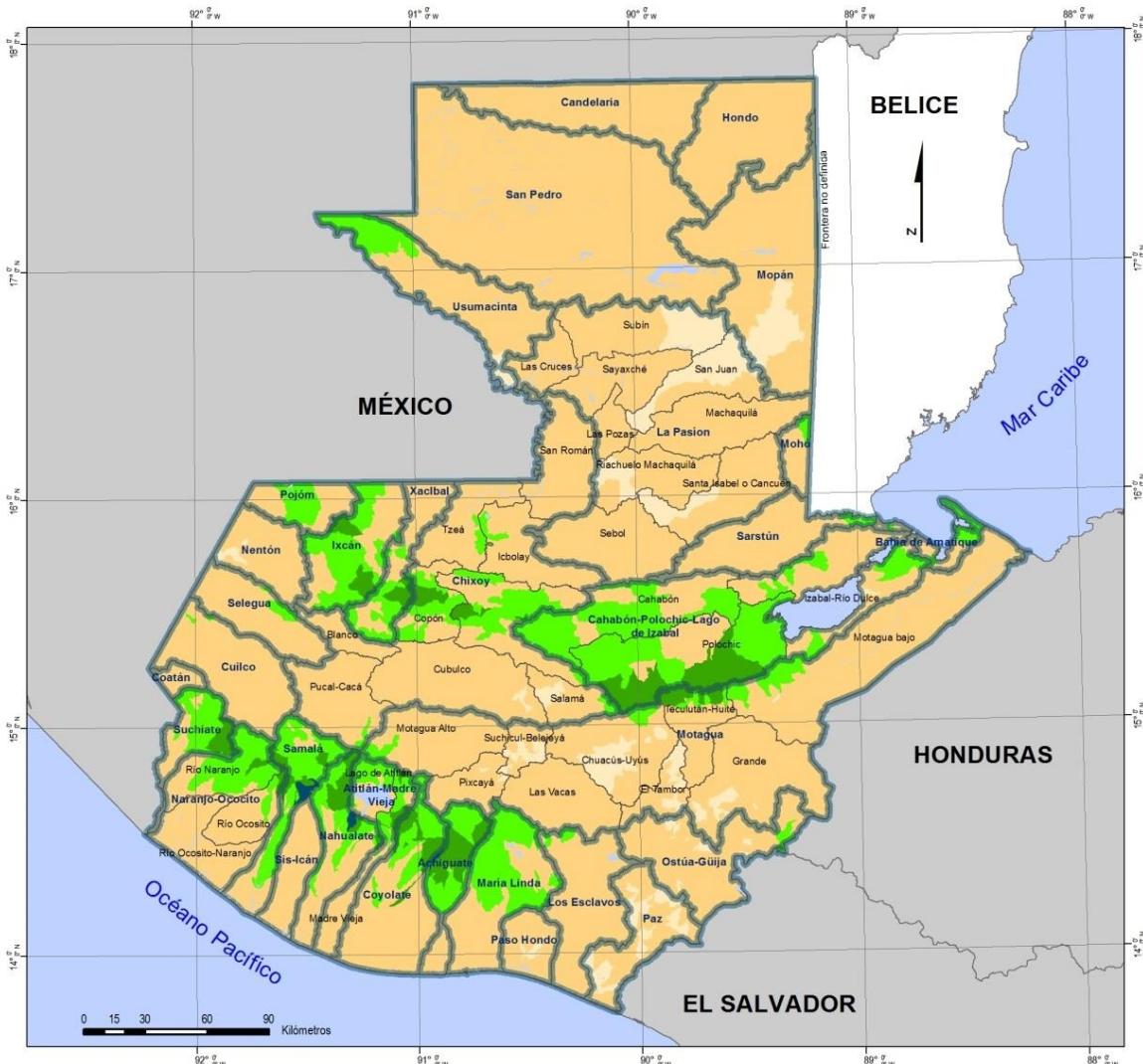


Figura 70. Distribución geográfica de las cinco categorías de priorización de microcuencas de Guatemala de acuerdo al uso del ICRH.

La Categoría 2 agrupa a 89 microcuencas con ICRH entre 62.5 y 75, las cuales abarcan un área total de 320,426 ha equivalente a cerca del 3% del territorio nacional. El mayor número de microcuencas (53) y la mayor extensión (1.3 %) se encuentran en la vertiente del Pacífico. Sin embargo también se muestra una considerable cantidad de microcuencas en la vertiente del caribe (14), abarcando una superficie de 119,000 ha y mostrando un tamaño promedio de aproximadamente 8500 ha. Estas unidades hidrológicas principalmente se encuentran agrupadas en la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas y abarcan aproximadamente un 1% del territorio de Guatemala. Respecto a la vertiente del Golfo de México presenta 22 microcuencas, abarcando 57,000 ha con un tamaño promedio de microcuenca de 2,600 ha

La Categoría 3 de priorización de microcuencas presenta un rango para el ICRH de 50 a 62.5 y muestra una distribución geográfica de manera más o menos concéntrica y complementaria a las categorías anteriores (Figura 26). De tal manera que se conforma un continuum con dos núcleos o agrupaciones. La primera agrupación se distribuye uniendo las estructuras volcánicas del centro-occidente de Guatemala. La segunda agrupación se distribuye desde la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas, interconectando hacia el embalse de Chixoy y extendiéndose hacia el noroccidente a las tierras altas de la Sierra de los Cuchumatanes, norte de Huehuetenango.

Entre las principales características de las microcuencas de esta categoría se encuentra que abarcan cerca del 13% de Guatemala (en las tres vertientes), suman 363 microcuencas con un tamaño promedio de 3,900 ha.

El resto de las microcuencas están agrupadas en dos categorías, denominadas 4 y 5, las cuales suman más de 1,900 microcuencas de un tamaño promedio aproximado de 4,000 ha y abarcando el 84% del territorio. Las unidades hidrológicas ubicadas en la vertiente del Golfo de México suman cerca del 43% del país, las de la vertiente Caribe el 25% y las del Pacífico el 15%.

4.4 Determinación de directrices generales para la implementación de actividades de conservación o restauración de microcuencas priorizadas

De acuerdo al marco metodológico descrito se definió la factibilidad técnica para impulsar trabajos de conservación o restauración en las microcuencas priorizadas por su alta captación y regulación hidrológica. Las cuencas priorizadas en éste acápite son las pertenecientes a las categorías 1 y 2, las cuales suman 95 microcuencas y están listadas y evaluadas de acuerdo a cada componente de priorización (Cuadro 8).

Cada microcuenca se describe particularmente de acuerdo a la vertiente que ocupa, su tamaño, el ICRH general y la valoración de cada uno de los componentes de evaluación (ya descritos anteriormente). Se define si la factibilidad es muy alta, alta o media de acuerdo al flujoograma binario de decisión mostrado en la Figura 5. La determinación del umbral para evaluar de alto o bajo cada uno de los componentes evaluados está en función de si sobrepasa el valor 10 para los componentes 1 y 2 y el valor 8 para los componentes 3 y 4. El valor del componente 5 sirve para definir si las acciones estratégicas son de conservación o restauración.

Es importante notar que la clase de microcuencas con factibilidad “muy alta” muestra una calificación superior a los umbrales ya descritos para cada uno de los componentes. En cambio sí muestra una de estas calificaciones por debajo del umbral la prioridad será “alta”.

Si muestra dos o más calificaciones debajo del umbral establecido la prioridad es media. No está de más recalcar que de esta manera se dio cumplimiento a la propuesta metodológica ya descrita.

Cuadro 21. Determinación de factibilidad de conservación/restauración de las microcuencas priorizadas.

Etiquetas de fila	Hectárea	ICRH	Componente	Componente	Componente	Componente	Componente	Factibilidad	Acción principal				
			1	2	3	4	5		Muy alta	Alta	Media	Conservación	Restauración
Caribe	119,080	921.75						119,080			119,080		
Cahabón-Polochic-Lago Izabal	98,454	396.25						98,454			98,454		
Polochic	98,454	396.25						98,454			98,454		
Mululja	5,293	67.75	15	15.5	8	13.75	15.5	5,293			5,293		
Pancajoc	3,820	64	15	15.5	8	12.5	13	3,820			3,820		
Pueblo Viejo	14,865	66.25	15	14	8	13.75	15.5	14,865			14,865		
Ribaco	14,684	66.25	15	14	8	13.75	15.5	14,684			14,684		
Sinanja	17,283	65.25	15	13	8	13.75	15.5	17,283			17,283		
Zarco	42,509	66.75	15	12	8	13.75	18	42,509			42,509		
Motagua	20,626	525.5						20,626			20,626		
Tecolután Huité	20,626	525.5						20,626			20,626		
Agua Fría	3,138	67.5	15	13	8	12.5	19	3,138			3,138		
Blanco	10,143	65	15	14	8	12.5	15.5	10,143			10,143		
Colorado 1	1,626	68.5	15	13	8	12.5	20	1,626			1,626		
Colorado 2	412	66	15	11.5	8	12.5	19	412			412		
La Virgen	380	64.5	15	11.5	8	12.5	17.5	380			380		
Pasabien	1,985	64	15	13	8	12.5	15.5	1,985			1,985		
Tecolután 1	1,859	66	15	14	8	12.5	16.5	1,859			1,859		
Tecolután 2	1,082	64	15	13	8	12.5	15.5	1,082			1,082		
Golfo Mexico	57,020	1493						31,943	25,077		57,020		
Chixoy	22,296	1031.75						-	19,696	2,600		22,296	
Chixoy	9,377	466.75						-	6,777	2,600		9,377	
Cuato Chorros 1	3,115	71.25	15	19	6	11.25	20		3,115		3,115		
Cuato Chorros 2	2,049	71.25	15	19	6	11.25	20		2,049		2,049		
Cuato Chorros 3	1,211	66.25	15	16.5	6	8.75	20		1,211		1,211		
Cuato Chorros 4	1,076	65.25	15	18	6	6.25	20		1,076		1,076		
Cuato Chorros 5	1,009	63.25	15	17	6	6.25	19		1,009		1,009		
Saquib	514	65.25	15	19	6	6.25	19		514		514		
Tzimajil	402	64.25	15	15.5	6	11.25	16.5		402		402		
Copón	12,919	565						12,919			12,919		
Jute	5,287	72	20	17.5	2	12.5	20		5,287		5,287		
Las Terneras	767	65	20	19	2	10	14		767		767		
Putul	2,116	67.5	20	19	2	12.5	14		2,116		2,116		
San Vicente 1	1,657	72.5	20	19	2	12.5	19		1,657		1,657		
San Vicente 2	286	72	20	17.5	2	12.5	20		286		286		
Xesáí	1,369	72	20	17.5	2	12.5	20		1,369		1,369		
Xolá	909	72	20	17.5	2	12.5	20		909		909		
Xosich	527	72	20	17.5	2	12.5	20		527		527		
Ixcán	22,477	192.25						22,477			22,477		
Ixcán	22,477	192.25						22,477			22,477		
Loco	1,229	63	15	19	6	5	18		1,229		1,229		
Quisil	10,989	65.25	15	20	6	6.25	18		10,989		10,989		
Yolhuitz	10,259	64	15	19	6	5	19		10,259		10,259		
Xacbal	12,247	269						12,247			12,247		
Xacbal	12,247	269						12,247			12,247		
Bisich	2,790	72	18	17.5	5	12.5	19		2,790		2,790		
Chel	2,600	67.5	18	16.5	5	12.5	15.5		2,600		2,600		
Lacantún	373	63.5	18	19	5	10	11.5		373		373		
Xacbal 1	6,485	66	18	19	5	10	14		6,485		6,485		

Continuación cuadro 8.

Etiquetas de fila	Hectárea	ICRH	Componente	Componente	Componente	Componente	Componente	Factibilidad			Acción principal	
			1	2	3	4	5	Muy alta	Alta	Media	Conservación	Restauración
Pacifico	155,055	4039.25						56,476	92,590	5,988	132,122	22,932
Achiguate	43,812	828.75						21,108	16,716	5,988	30,106	13,707
Achiguate	43,812	828.75						21,108	16,716	5,988	30,106	13,707
Achiguate 1	674	75	20	14	17	12.5	11.5	674			674	
Achiguate 2	158	71	20	11.5	17	12.5	10	158				158
Aguá Blanca	1,775	67	17.5	9.5	17	10	13		1,775		1,775	
Ceniza	1,336	76.5	20	13	17	12.5	14		1,336		1,336	
El Capalín	3,173	63	20	10.5	17	2.5	13		3,173		3,173	
El Jute	1,116	71	20	10	17	12.5	11.5		1,116		1,116	
El Tigre	2,372	66.5	20	13	17	5	11.5		2,372		2,372	
Guacalate 1	13,548	67.5	17.5	11.5	17	12.5	9	13,548				13,548
Guacalate 2	5,988	65.5	20	9.5	17	7.5	11.5		5,988		5,988	
Las Cañas	2,131	72.5	20	11.5	17	12.5	11.5	2,131			2,131	
Pensativo	8,281	64.25	17.5	9.5	17	8.75	11.5		8,281		8,281	
Platanares	3,259	69	20	11.5	17	10	10.5	3,259			3,259	
Coyolate-Acomé	26,501							26,501			26,501	
Coyolate-Acomé	26,501							26,501			26,501	
Coyolate-Acomé 1	384	65.25	20	12	14	1.25	18		384		384	
Coyolate-Acomé 2	2,632	62.75	17.5	13.5	14	3.75	14		2,632		2,632	
Nicá 3	9,750	65.75	17.5	14	14	6.25	14		9,750		9,750	
Pantaleón	13,735	64.75	20	10.5	14	6.25	14	13,735			13,735	
Madre Vieja-Atíatlá	6,696							6,696			6696.06	
Madre Vieja	6,696							6,696			6696.06	
Madre Vieja-Atíatlán 1	399	68.5	20	15	7	12.5	14		399		399	
Madre Vieja-Atíatlán 2	853	66.5	17.5	14	7	12.5	15.5		853		853	
Patzaj	1,634	63	17.5	13	7	12.5	13		1,634		1,634	
San Jorge 1	2,302	66.5	17.5	13	7	12.5	16.5		2,302		2,302	
San Jorge 2	794	65.5	20	12	7	12.5	14		794		794	
San Jorge 3	473	64	17.5	13	7	12.5	14		473		473	
Santa Teresa	241	69	20	11.5	7	12.5	18		241		241	
Nahualate	30,846							19,307	11,539		28,806	2,039
Nahualate	30,846							19,307	11,539		28,806	2,039
Cutzán	3,092	75.5	20	14.5	13	12.5	15.5	3,092			3,092	
Nahualate 1	5,812	70	20	10.5	13	12.5	14	5,812			5,812	
Nahualate 2	1,927	69	17.5	12	13	12.5	14	1,927			1,927	
Nahualate 3	1,595	66.25	17.5	13	13	6.25	16.5		1,595		1,595	
Nahualate 4	7,149	65.25	20	14.5	13	6.25	11.5		7,149		7,149	
Nicá 2	2,701	74	20	14.5	13	12.5	14	2,701			2,701	
Paquiacamiyá	340	66	17.5	14	13	15	6.5	340				340
Payatzá	1,427	67.5	17.5	10.5	13	12.5	14	1,427			1,427	
Siguacán	2,428	64	20	12	13	5	14		2,428		2,428	
Yatzá 1	382	71.5	17.5	12	13	15	14	382			382	
Yatzá 2	289	70	17.5	11.5	13	12.5	15.5	289			289	
Yatzá 3	2,004	67.25	20	14	13	8.75	11.5	2,004			2,004	
Yatzá 4	1,075	65.25	17.5	12	13	13.75	9	1,075				1,075
Yatzá 5	258	63.5	17.5	13	13	15	5	258				258
Yatzá 6	367	63.5	17.5	9	13	15	9		367			367

Continuación Cuadro 8

Etiquetas de fila	Hectárea	ICRH	Componente					Factibilidad			Acción principal	
			1	2	3	4	5	Muy alta	Alta	Media	Conservación	Restauración
Ostúa-Güija	595	68.5						595			595	
Ostúa-Güija	595	68.5						595			595	
Injerto	595	68.5	13	16.5	11	10	18	595			595	
Río Ocosito-Río Narar	8,170	214						63	8,108		8,170	
Río Naranjo	3,745	145.5						63	3,682		3,745	
Naranjo-Ocosito 1	63	74	20	14	12	12.5	15.5	63			63	
Talcil	3,682	71.5	20	14	12	7.5	18		3,682		3,682	
Río Ocosito	4,425	68.5							4,425		4,425	
Naranjo-Ocosito 2	4,425	68.5	20	15.5	9	7.5	16.5		4,425		4,425	
Samalá	22,592	1053						15,404	7,188		15,406	7,186
Samalá	22,592	1053						15,404	7,188		15,406	7,186
Calahuaché	925	78.25	18	14.5	18	11.25	16.5	925			925	
Concepción 1	3,128	73.25	18	14.5	18	11.25	11.5	3,128			3,128	
Concepción 2	19	63	18	8	18	12.5	6.5	19				19
Cuache	328	65.25	18	13	18	6.25	10		328			328
Curruquiche	3,286	63.75	15.5	11.5	18	6.25	12.5	3,286			3,286	
El Torito	1,913	62.75	18	13	18	6.25	7.5		1,913			1,913
Eschaquichoj	2,950	64.25	18	12	18	6.25	10		2,950			2,950
Ixcayá	349	67	18	15.5	18	5	10.5		349		349	
Matilde	986	65.5	18	14.5	18	5	10		986			986
Pachamiyá	874	80.5	18	14	18	12.5	18	874			874	
Samalá 3	364	70.5	15.5	14	18	10	13	364			364	
Samalá 4	1,978	70.25	15.5	14	18	8.75	14	1,978			1,978	
Santa María de Jesú	3,749	82.75	18	16.5	18	13.75	16.5	3,749			3,749	
Tzarájmacá	752	83	18	15.5	18	12.5	19	752			752	
Xequijel	990	63	18	12	18	7.5	7.5		990			990
Suchiate	15,842	135						15,842			15,842	
Suchiate	15,842	135						15,842			15,842	
Cabuz	12,207	66	20	14	13	7.5	11.5		12,207		12,207	
Mopá	3,635	69	20	14.5	13	7.5	14		3,635		3,635	
Total general	331,155							175,556	124,533	31,065	308,222	22,932
Porcentajes	100							53	38	9	93	7

Las 14 microcuencas priorizadas para la vertiente Caribe mostraron una factibilidad de conservación muy alta, totalizando 119,000 ha. En tal sentido las acciones estratégicas deben ir encaminadas a la conservación. Otro aspecto destacable es que todas las unidades hidrológicas o microcuencas se encuentran localizadas en una gran proporción en las cuencas Polochic y Motagua en la Sierra de las Minas.

Las 22 microcuencas priorizadas en la vertiente del Golfo de México muestran una factibilidad alta (31,943 ha, 16 microcuencas) y factibilidad media (25,077 ha, 6 microcuencas). Estas mostraron una calificación debajo del umbral en el componente 3, el cual es el de impacto social y servicios ecosistémicos. Esto es útil para deducir que la densidad poblacional y la demanda de recursos hídricos y los servicios hidrológicos son relativamente bajos. En los otros cuatro componentes muestra puntuaciones muy superiores al umbral. La principal acción estratégica es la conservación de los servicios hidrológicos.

Las 60 microcuencas priorizadas en la vertiente Pacífico suman un total de 155,055 ha. Con factibilidad muy alta principalmente, con fines de conservación, son 56,476 ha. Estas unidades hidrológicas se encuentran ubicadas en las cuencas Achiguate, Nahualate, Ostúa Güija y Samalá.

Las microcuencas con factibilidad alta suman 92,590 ha y son aquellas ubicadas en las cuencas Atitlán, Coyolate, Naranjo y Ocosito. En general estas microcuencas presentan valores relativamente bajos en impacto socioambiental y servicios ecosistémicos, lo cual hace suponer poca población amenazada por inundaciones, sequías y deslizamientos.

La mayor parte (80%) de las microcuencas presentan como acciones estratégicas la de conservación y 20% presentan como acción prioritaria la restauración hidrológico forestal. Destacan en este último aspecto 4 microcuencas tributarias del río Nahualate y 7 del río del río Samalá.

En términos generales las tres vertientes presentan una factibilidad muy alta para acciones de conservación. En este sentido las microcuencas con una factibilidad muy alta de conservación suman 175,556 ha, alta factibilidad 124,533 ha y media 31,065. Estas categorías suman aproximadamente 330,000 ha con objetivos prioritarios de conservación. Por lo tanto los incentivos de conservación que Guatemala invierte deberían enfocarse en estas microcuencas.

4.5 Impactos esperados de la gestión adecuada de las microcuencas priorizadas

Para el siguiente análisis se utiliza como referencia la figura 26, el mapa de la categorización de las microcuencas de acuerdo a la aplicación del ICRH; el cuadro 9, resumen de indicadores y componentes para la generación del ICRH, de acuerdo a las vertientes hidrográficas y agrupación de categorías y las figuras 27, 28, 29, 30 y 31, integración de indicadores de los Componente 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente; así como el Cuadro 10, es decir, la disponibilidad hídrica de acuerdo a las categorías de priorización de microcuencas de Guatemala.

Con el fin de analizar el impacto de la conservación/restauración de las microcuencas definidas como prioritarias para la captación y regulación hidrológica es adecuado agruparlas en las categorías 1, 2 y 3. Estas suman 458 microcuencas con una extensión territorial de 1.7 millones de ha equivalente al 16% del territorio nacional, las cuales de manejarse adecuadamente puede garantizar la captación de al menos el 26% de la disponibilidad hídrica aparente, es decir del agua que queda al restarle la evapotranspiración a la precipitación total. Dicha disponibilidad anual equivalente a 23,000 millones de m³ de agua aproximadamente. Un comportamiento muy similar se aprecia con la recarga hídrica, la cual asciende a cerca de 6,000 millones de m³, siendo el 25% de la recarga hídrica del país (Cuadro 10). Otro dato interesante se aprecia en la Figura 32 en la que aparece que la lámina de recarga es notoriamente superior en las Categorías 1, 2 y 3, especialmente en la vertiente del Pacífico. Es destacable que el valor promedio de recarga hídrica en estas microcuencas se estima que es de más de 400 mm / año y el valor promedio para Guatemala es de 230 mm / año.

Como referencia para ilustrar la importancia de la gestión de las microcuencas priorizadas en las categorías 1, 2 y 3 se puede mencionar que la economía y el abastecimiento de agua potable de todos los guatemaltecos demandan anualmente un aproximado de 20,000 millones de m³. Aunque este dato no incluye la agricultura de secano (15,000 millones de m³) (IARNA, 2013) y no toma en cuenta problemas asociados a la disponibilidad estacional y espacial; ni el cambio climático. Sin embargo es evidente que la conservación o restauración de al menos las microcuencas priorizadas sería un paso fundamental para tener mayor certeza en el abastecimiento de agua.

Se estima que actualmente la demanda de agua para el consumo humano es de alrededor de 500 millones de m³. Sin embargo algunos autores como Revenga et al. (2000) mencionan que

el estrés hídrico empieza a experimentarse en disponibilidades menores a los 1,700 m³/persona/año. Este autor menciona además, que en las zonas cuya disponibilidad sea inferior 1,000 m³/persona/año ya se pueden enfrentar crisis sociales y alta conflictividad. Para el caso de Guatemala la cantidad mínima de captación debería ser de cerca de 20,000 millones de m³ al año.

La gestión adecuada de éstas mismas 458 microcuencas es crítica además para la regulación del flujo hídrico y mantener la capacidad productiva de los suelos, ya que se evita la pérdida de cerca 350 Toneladas métricas (TM) / ha / año de suelo. Cabe destacar que este valor casi duplica el valor de susceptibilidad a la erosión a nivel nacional, el cual es en promedio de cerca de 210 TM / ha / año y el valor permisible con una buena gestión de la cobertura es de menos de 10 TM / ha / año.

Asimismo la conservación de estas microcuencas beneficia directa e indirectamente a más del 30% de población guatemalteca amenazada por sequías, inundaciones o deslizamientos. Esto sin contar los beneficiarios en los países vecinos de México, Belice, Honduras y El Salvador.

La conservación de estas unidades hidrológicas es crítica por su ubicación estratégica para el sistema socioecológico del Guatemala. Por ejemplo el 70% de su extensión está ubicada dentro áreas protegidas del SIGAP, entre ellas, se pueden mencionar las vinculadas a la cadena volcánica, Reserva de Biosfera Sierra de las Minas, Sierra de los Cuchumatanes, etc. Están vinculadas a los principales cuerpos de almacenamiento de agua, tanto naturales como lagos de Atitlán, Izabal y otros. Asimismo están asociadas a la presencia de las instalaciones para el almacenamiento de agua con fines de generación eléctrica, tal como Chixoy, Jurún Marinalá, palo alto, varias en las Sierra de las Minas. Su ubicación también está vinculada a los sitios críticos de regulación hidrológica en el país.

4.6 Impacto del cambio climático

Para analizar el papel que la priorización de microcuencas puede tener para enfrentar los cambios hidrológicos que el cambio climático puede representar, se hizo un ejercicio de sobreposición cartográfica. Este ejercicio se puede visualizar en las Figuras 33 y 34 y consistió en sobreponer las áreas de Categorías 1 y 2 y 3 sobre un mapa de la dinámica de zonas de vida para el año 2000, 2020, 2050 y 2080. Este mapa de zonas de vida (utilizando la metodología propuesta por Holdridge, 1971) fue elaborado por el IARNA (IARNA, 2012) basado el escenario A2 propuesto por Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) y con información cartográfica a escala de 1 Km emanada del Centro de Investigación Agrícola Tropical (CIAT).

Los resultados presentados en la Figura 33 se puede apreciar un gradiente de colores desde el azules las zonas de vida muy húmedas, es decir con precipitaciones promedio anual superiores a 2000 mm y temperatura promedio anual inferiores a 12°C. En colores verde se aprecian las zonas de vida húmedas, es decir aquellas zonas de vida con precipitaciones entre 1,000 y 2,000 mm y temperaturas entre 12 y 18 °C. Las anteriores zonas de vida se caracterizan porque la evapotranspiración potencial es inferior a las precipitaciones anuales, de ahí que se denominan húmedas y muy húmedas. En color corinto se visualizan las zonas de vida secas y muy secas, las cuales se caracterizan por presentar una relación evapotranspiración / precipitación superiores a 1, es decir, la evapotranspiración potencial es superior a la precipitación promedio anual.

Con estos antecedentes se logra evidenciar, en primer lugar, los profundos cambios que se podrán presentar de cumplirse los escenarios de cambio climático propuestos. Guatemala de presentar un 25% de su superficie con ecosistemas deficitarios desde el punto de vista hídrico y 75% con superficie de ecosistemas excedentarios pasará, en el año 2080, a ser un país con estas proporciones invertidas. Es decir que será un país eminentemente deficitario de agua, al menos en un 75% de su territorio. En este sentido las microcuencas priorizadas seguirán estando ubicadas en sitios excedentarios de agua a tal grado que en el año 2000 representan aproximadamente el 20% de los ecosistemas húmedos y muy húmedos, sin embargo, para el año 2080 abarcarán cerca del 50% de este tipo de ecosistemas.

Para ilustrar los resultados anteriores se presenta la Figura 34, en la que se puede apreciar el mismo patrón de coloración definido anteriormente, visualizándose delimitadas por una línea azul las categorías 1 y 2 y la categoría 3 delimitada por una línea fucsia. Se puede apreciar como las microcuencas priorizadas pasan, de manera general, de estar en regiones húmedas y muy húmedas cambia de ser mayoritariamente a constituirse en una región con predominancia ecosistemas secos.

Cuadro 22. Resumen de indicadores y componentes para la generación del ICRH, de acuerdo a las vertientes hidrográficas y agrupación de categorías.

Etiquetas de fila		Total general					Categorías 1, 2 y 3					Categorías 1 y 2					
		Caribe	Golfo Mexico	Pacifico	Total	Caribe	Golfo Mexico	Pacifico	Total	Caribe	Golfo Mexico	Pacifico	Total	Caribe	Golfo Mexico	Pacifico	
	Area (ha)	Σ	3,342,546	5,077,339	2,407,687	10,827,572	587,647	439,762	716,294	1,743,703	119,080	57,020	155,055	331,155			
	%		100	100	100	100	18	9	30	16	4	1	6	3			
	Cantidad	Σ	742	769	880	2,391	67	142	249	458	14	22	59	95			
	Tamaño microcuencas	X	4,505	6,603	2,736	4,528	8,771	3,097	2,877	3,807	8,506	2,592	2,628	3,486			
	ICRH	X	35.6	41.3	42.5	40.0	56.8	56.8	58.4	57.7	65.8	67.9	68.5	67.9			
1	ETP/PP	X	0.93	0.59	0.68	0.73	0.47	0.45	0.51	0.48	0.39	0.43	0.49	0.46			
1	Recarga hídrica (mm/año)	X	158	225	311	236	215	297	461	374	256	334	465	404			
1	Componenete 1	X	8.3	12.5	12.9	11.3	13.4	15.7	17.7	16.4	15.0	17.4	18.5	17.7			
2	Erodabilidad suelos (factor K)	X	0.310	0.347	0.348	0.336	0.282	0.472	0.274	0.337	0.194	0.594	0.234	0.311			
2	Erosividad lluvia (Factor R)	X	207	326	290	276	271	409	332	347	278	421	371	369			
2	Factor LS	X	2.30	2.42	2.08	2.26	2.95	3.02	2.48	2.72	3.27	3.29	2.96	3.08			
2	Multiplicación de factores	X	148	274	210	210	226	584	226	318	177	822	257	354			
2	Cobertura cuerpos agua (Km)	X	53.3	57.7	44.7	51.7	73.7	79.8	66.3	71.7	92.6	92.8	76.5	82.7			
2	Componente 2	X	8.8	10.9	8.8	9.5	12.2	15.6	10.8	12.5	13.4	18.1	12.8	14.1			
3	Población vulnerable inundac.	Σ	19,906,765	9,718,651	64,046,604	93,672,020	1,713,636	578,116	28,538,781	30,830,533	332,454	28,652	6,542,964	6,904,070			
3	Porcentaje del total general		100	100	100	100	9	6	45	33	2	0	10	7			
3	Población vulnerable sequías	Σ	51,034,903	21,719,424	86,791,645	159,545,972	2,053,318	738,687	36,862,502	39,654,507	501,360	93,023	7,168,904	7,763,287			
3	Porcentaje del total general		100	100	100	100	4	3	42	25	1	0	8	5			
3	Población vulnerable deslizam.	Σ	70,786,850	36,867,783	98,069,625	205,724,258	2,776,273	11,828,157	38,566,468	53,170,898	449,670	1,740,551	7,334,615	9,524,836			
3	Porcentaje del total general		100	100	100	100	4	32	39	26	1	5	7	5			
3	Total población vulnerable		141,728,518	68,305,858	248,907,874	458,942,250	6,543,227	13,144,960	103,967,751	123,655,938	1,283,484	1,862,226	21,046,483	24,192,193			
3	Porcentaje del total general		100	100	100	100	5	19	42	27	1	3	8	5			
3	Demanda de agua	Σ	10,478,632,154	4,369,430,867	14,991,507,631	29,839,570,652	422,161,059	660,933,239	5,687,767,650	6,770,861,948	77,581,268	84,670,116	1,057,667,114	1,219,918,498			
3	Porcentaje del total general		100	100	100	100	4	15	38	23	1	2	7	4			
3	Cobertura cuerpos de agua %	X	0.52	0.47	0.97	0.68	0.69	0.36	1.14	0.83	0.74	0.33	0.89	0.73			
3	Componente 3	X	7.4	5.9	11.8	8.6	6.9	5.0	14.1	10.2	8.0	4.4	14.3	11.1			
4	Inversión municipal per cápita	X	22	14	13	17	9	11	11	11	6	5	15	12			
4	Cobertura áreas protegidas (%)	X	52	45	37	45	81	56	46	56	97	72	62	70			
4	Capacidad instalada de MW	Σ	15	78	25	39	44	212	43	96	58	224	29	79			
4	Componente 4	X	4.2	3.1	3.4	3.6	9.9	6.1	6.5	6.9	12.9	10.0	9.9	10.4			
5	Cobertura forestal (%)	X	27	36	18	27	60	60	33	46	75	83	48	60			
5	Cobertura bosque denso (%)	X	9	12	4	8	38	32	10	21	63	71	19	38			
5	Cobertura sobre uso suelo (%)	X	38	45	34	39	63	67	49	57	66	82	63	68			
5	Componente 5	X	7.0	8.8	5.5	7.0	14.4	14.4	9.3	11.6	16.5	18.0	12.9	14.7			

Cuadro 23. Disponibilidad hídrica de acuerdo a las Categorías de priorización de microcuencas de Guatemala.

Clases de microcuencas	Área (ha)	%	Disponibilidad hídrica aparente m ³	%	Área (ha)	%	Disponibilidad hídrica aparente m ³	%	Recarga hídrica m ³	%
Categoría 1	10,738	0.1	145,645,883	0.2						
Categoría 2	320,435	3.0	4,206,987,833	4.7	1,743,730	16	23,625,561,423	26	6,160,668,450	25
Categoría 3	1,412,557	13.0	19,272,927,708	21.3						
Categoría 4	8,610,056	79.5	66,125,230,080	73.2	8,610,056	80	66,125,230,080	73	17,863,631,105	72
Categoría 5	473,830	4.4	626,166,345	0.7	473,812	4	626,166,345	1	614,808,124	3
Totales	10,827,616	100	90,376,957,848	100	10,827,580	100	90,376,957,848	100	24,604,6019,818	100

Fuente: Elaboración propia basada en datos de balance hídrico nacional realizado por IARNA, 2015.

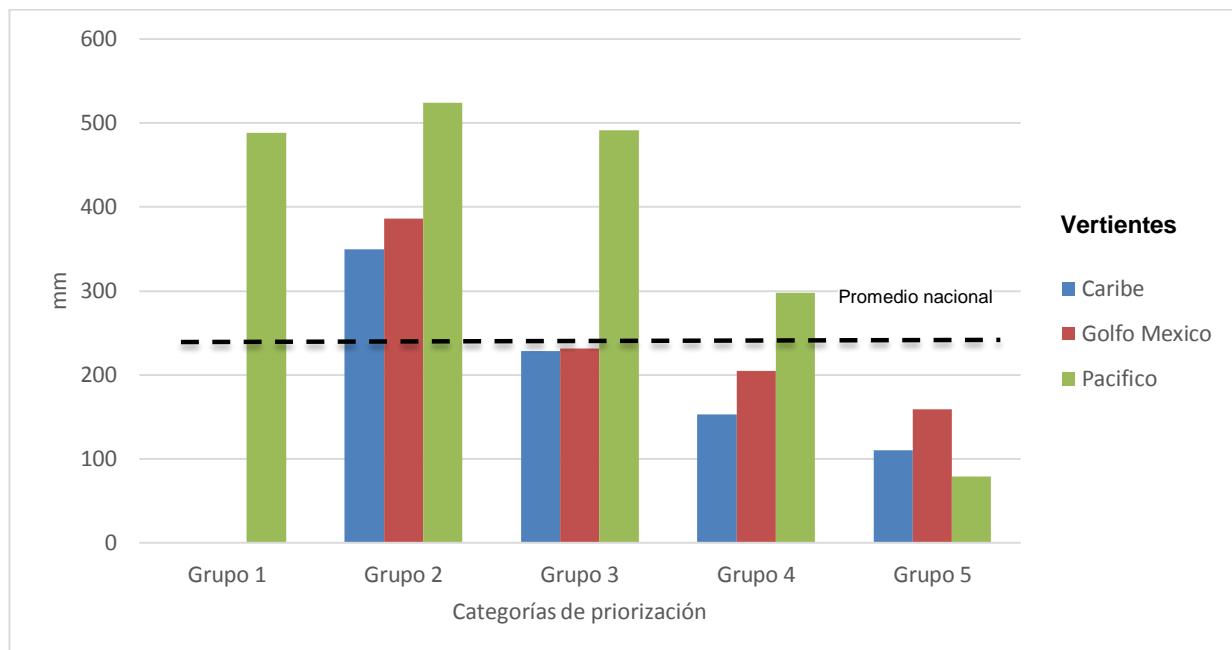


Figura 71. Distribución geográfica de las cinco categorías de priorización de microcuencas de Guatemala

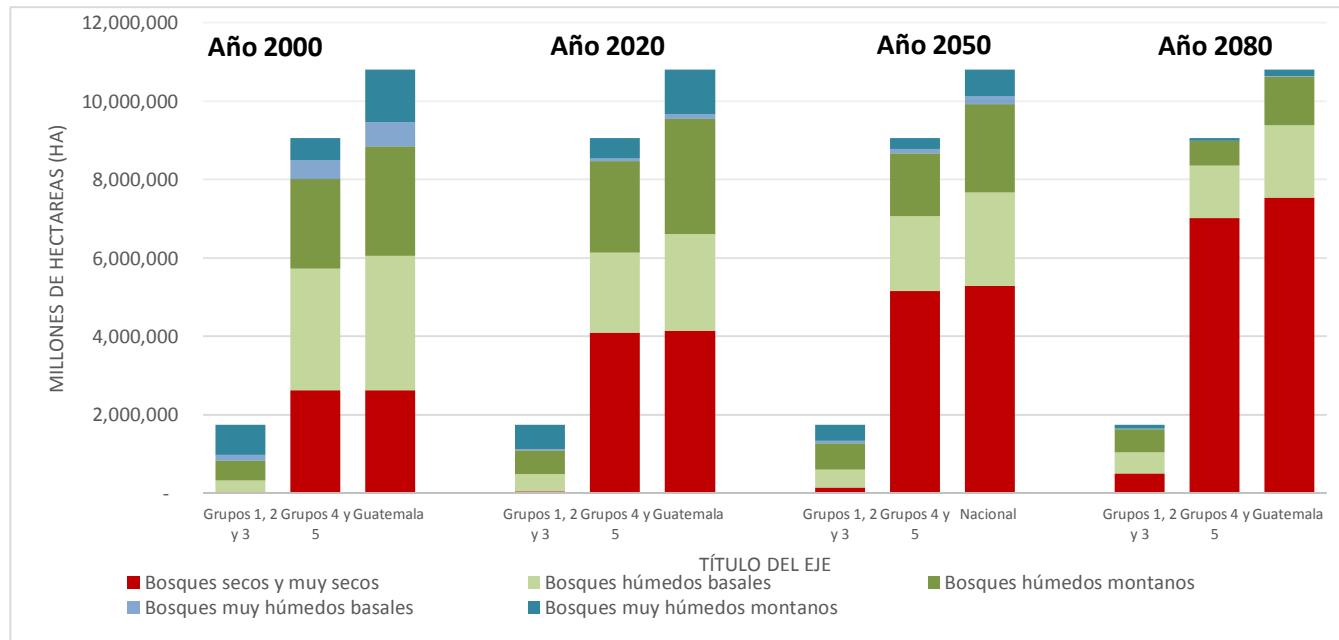


Figura 72. Efecto del cambio climático en las captación hídrica en las categorías de microcuencas priorizadas (Escenario A2).

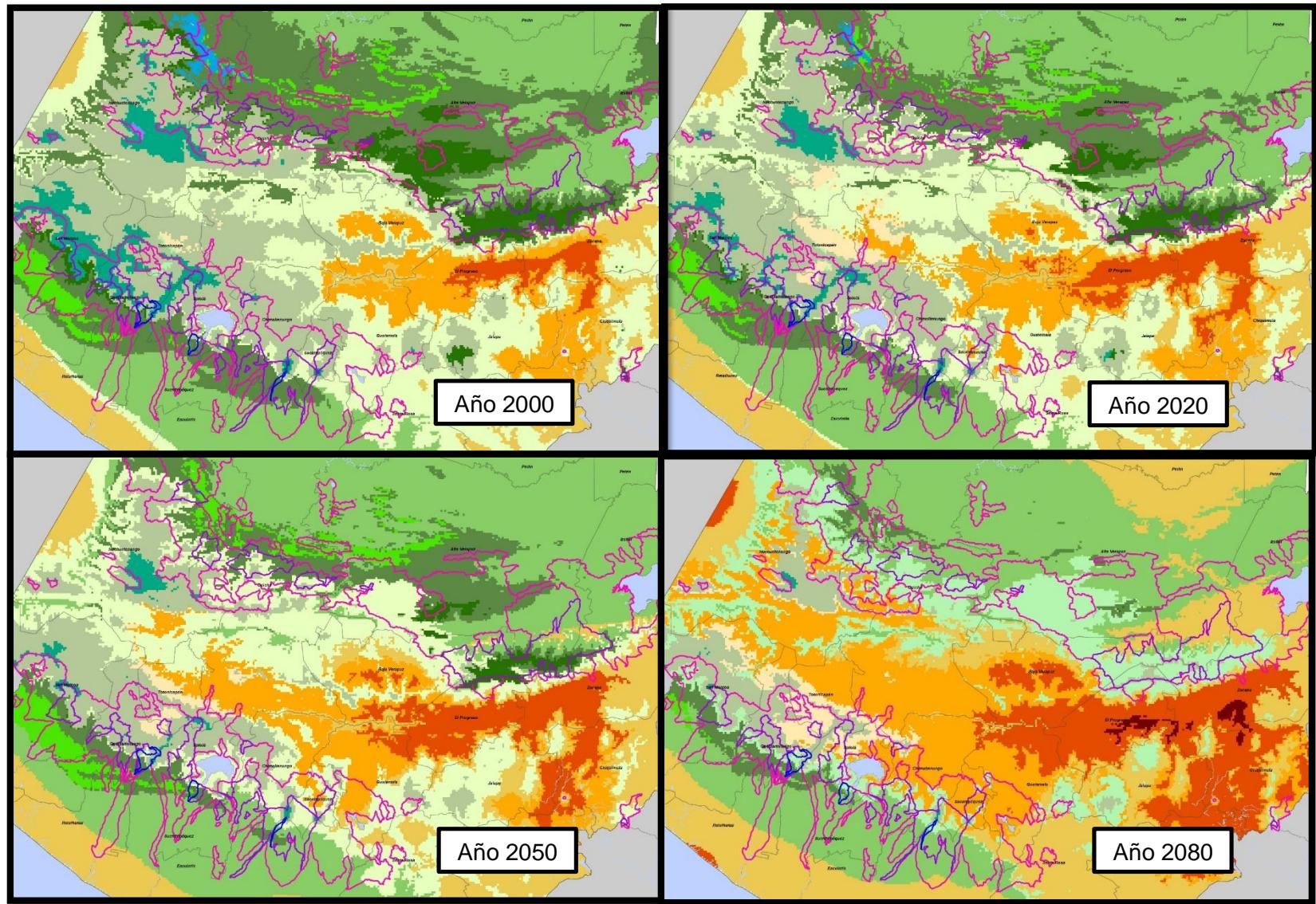


Figura 73. Efecto del cambio climático en las categorías de microcuenas priorizadas (Escenario A2).

5. Conclusiones

Uno de los principales aportes de este trabajo es la priorizaron, con un enfoque sistémico, de los territorios de gestión hidrológica a escala de microcuencas. Para tal fin se elaboró un Índice de captación y regulación hidrológica (ICRH), evaluándose cada una de las 2391 microcuencas definidas para Guatemala. De acuerdo a la escala elaborada se determinaron cinco diferentes categorías.

La agrupación de las categorías 1, 2 y 3 integra 458 microcuencas con la mayor puntuación respecto al ICRH, las cuales suman una extensión territorial de 1.7 millones de ha equivalente al 16% del territorio nacional. Se estima que de manejarse adecuadamente este territorio es posible garantizar la captación de al menos el 26% de la disponibilidad hídrica nacional (precipitación menos evapotranspiración). Esto es equivalente a 23,000 millones de m³ de agua.

La gestión adecuada de este grupo de 458 microcuencas, además, es crítica para la regulación del flujo hídrico de ciclo corto y para mantener la capacidad productiva de los suelos, ya que se evita la pérdida de cerca 350 Toneladas métricas (TM) / ha / año de suelo. Cabe destacar que este valor casi duplica el valor de susceptibilidad a la erosión a nivel nacional, el cual es en promedio de cerca de 210 TM / ha / año y el valor permisible con una buena gestión de la cobertura es de menos de 10 TM / ha / año.

La conservación de estas unidades hidrológicas es crítica, además, por su ubicación estratégica para el sistema socioecológico de Guatemala. Por ejemplo el 70% de su extensión está ubicada dentro áreas protegidas, que por sus dimensiones y estado de conservación, se pueden considerar como las más importantes de Guatemala, por ejemplo la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas. Además están vinculadas a los principales cuerpos de almacenamiento de agua, tanto naturales, tal como el lago Atitlán, lago Izabal y diversos humedales. Asimismo están asociadas a la presencia de las instalaciones para el almacenamiento de agua con fines de generación eléctrica, tal como Chixoy, Jurún Marinalá, entre otras. Su ubicación también está vinculada a los sitios críticos de regulación hidrológica en el país, por ejemplo, parte aguas de las tres vertientes del país y presentan altos niveles de bosque denso y cobertura forestal.

6. Recomendaciones

Entre las principales recomendaciones destaca el fortalecimiento institucional de aquellas instancias involucradas con la conservación y restauración de sitios críticos para la regulación hidrológica. Especialmente, el Instituto Nacional de Bosques (INAB), Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP), administradores y coadministradores de áreas protegidas, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA).

Organizar y establecer responsabilidades diferenciadas pero complementarias de las diversas instituciones para conservar los servicios hidrológicos de las microcuencas priorizadas en este trabajo. Especialmente dirigidos a los administradores de áreas protegidas cuando ésta sea la jurisdicción, al INAB para el fomento de instrumentos técnicos y financieros en sitios afuera de áreas protegidas. Acompañamiento e incorporación de las autoridades municipales y organizaciones no gubernamentales pertinentes.

Es clave fortalecer los escasos instrumentos financieros, tal como el Programa de Incentivos Forestales –PINFOR- y el Programa Piloto de Apoyos Forestales Directos PARPA/PPAFD. Asimismo es crítico priorizar inversiones financieras de múltiples actores, especialmente los institucionales.

Se recomienda la aplicación de directrices de manejo de la cobertura del suelo en las áreas priorizadas, de tal manera que se adapten en lo posible a la realidad socioeconómica de la población local.

Se recomienda el fomento y establecimiento de sistemas agroforestales en áreas de cultivos y en las cuales de acuerdo a las directrices de manejo se está proponiendo la recuperación del bosque.

Es crítico promover la participación activa de la población vinculada a las regiones priorizadas y con el fin de se conozca donde se encuentran las tierras de mayor captación y regulación hidrológica y se valore la importancia de estas zonas.

Es importante que se impulse la aprobación de la Ley de Aguas o de un documento legal que ampare la protección, conservación y manejo sostenible de los sitios críticos para la regulación hidrológica. Asimismo deben promoverse instrumentos técnicos y financieros adecuados y sobre todo suficientes para abordar los principales aspectos de sostenibilidad, los cuales deben estar basados en el conocimiento científico de la distribución espacial y temporal, así como la regulación del ciclo hidrológico a escala local.

Desarrollar un sistema de información que integre los servicios ecosistémicos de regulación de ciclo largo, regulación de ciclo corto y provisión de agua. Para tal fin es necesario desarrollar uno o varios protocolos que definan el levantamiento de información con variables ecológicas, hidrológicas, hidrogeológicas, hidroquímicas (isótopos estables), climáticas y de contabilidad ambiental y económica integradas. Este último tema deberá estudiar los activos y flujos de agua del ambiente a la economía, dentro de la economía y de la economía al ambiente, incluyendo los sectores de hogares, industria, agricultura y energía.

7. Bibliografía

- Adger, N. (2003). Social Capital, Collective Action, and Adaptation to Climate Change. *Economic Geography*, 79(4), 387-404.
- Adger, N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(1), 268–281.
- Adger, N., & Vincent, K. (2005). External Geophysics, Climate and Environment. Uncertainty in adaptive capacity. *C.R. Geoscience*, 337, 399–410.
- Adger, N., Arnel, N., & Tompkins, E. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15, 77-86.
- Adger, N., Huq, S., Brown, K., Conway, D., & Hulme, M. (2003). Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in Development Studies* 3,3 (2003) pp. 179–195, 179-195.
- Adger, N., Huq, S., Brown, K., Conway, D., & Hulme, M. (2012). Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in development studies*, 47, 47-55.
- Agrawala, S. (2003). Climate Change and Development. *IDS Bulletin* 35.3, 35(3), 51-59.
- Alianza para la Conservación de los Bosques de Pino-Encino de Mesoamérica. (2008). *Plan de conservación de los bosques de pino-encino de Centroamérica y el ave migratoria dendroica chrysoptaria*. (C. Pérez, E. Secaira, & S. Macías, Edits.) Guatemala: Fundación Defensores de la Naturaleza.
- Andrade, G. I., Sandino, J. C., & Aldana-Domínguez, J. (2011). *Biodiversidad y territorio innovación para la gestión adaptativa frente al cambio global. Insumos técnicos para el plan de acción nacional para la gestión integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos*. Bogotá: Instituto Humboldt, Colombia.
- Aronson, R. (2009). Overview - Climate Change and Adaptation. *Sustainability 2009: The Next Horizon*, edited by G. L. Nelson and I. Hronszyk, 1-10.
- Ayers, J., & Dodman, D. (2010). Climate change adaptation and development I: the state of the debate. *Progress in Development Studies* 1, 10(2), 161-168.
- Beg, N., Morlot, J. C., Davidson, O., Afrane-Okesesse, Y., Tyani, L., Denton, F., . . . Rahman, A. A. (2002). Linkages between climate change and sustainable development. *Climate Policy*, 2, 129-144.
- Bird Species and Climate Change: The Global Status Report version 1.0. (2007). *A Climate Risk Report The Global Status Report: A synthesis of current scientific understanding of anthropogenic climate change impacts on global bird species now, and projected future effects*.
- Bowen, A., Cochrane, S., & Fankhauser, S. (2012). Climate change, adaptation and economic growth. *Climatic Change*, 113, 95–106.

- Braat , L., & Groot, R. (2012). The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. *Ecosystem Services*, 4-15.
- Brooks, N., Grist, N., & Brown, K. (2009). Development Futures in the Context of Climate Change: Challenging the Present and Learning from the past. *Development Policy Review*, 2009, 27(6), 741-765.
- Burkharda, B., de Groot, R., Constanza, R., Seppelt, R., Jorensen, S., & Potschin, M. (2012). Editorial: Solutions for sustaining natural capital and ecosystem services. *Ecological Indicators*, 21, 1-6.
- Burton, I., Huq, S., Lim, B., Pilifosova, O., & Schipper, E. L. (2002). From impacts assessment to adaptation priorities:the shaping of adaptation policy. *Climate Policy*, 2, 145–159.
- CATIE. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica*. Turrialba: CATIE-ASDI.
- Chen, X., Zhang, X.-S., & Li, B.-L. (2003). The possible response of life zones in China under global climate change. *Global and planetary change*, 38, 327–337.
- Collier, B., & al., e. (2012). Predicting patch occupancy in fragmented landscapes at the rangewide scale for an endangered species, an example of an American wrbler. *Diversity and Distribution*, 18, 158–167.
- Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América . (2000). *Evaluación de Recursos de agua de Guatemala*. Mobile: United States Southern Command.
- de Groot, R. S., Alkemade, S., Braat, L., Hein, L., & Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological complexity*, 267-272.
- de Groot, R., Alkemade, R., Braat , L., Hein, L., & Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 7, 260-272.
- Fankhauser, S., Smith, J., & Tol, R. (1999). Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions. *Ecological economics*, 30, 67-78.
- Fisher, G., Shah, M., Tubiello, F., & Vehluizen, F. (Gu" nther Fischer1,* , Mahendra Shah1, Francesco N. Tubiello1,2 de 2005). Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. *Philosophical transactions, Royal Society* 360, 360, 2067–2083.
- Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16, 253-267.
- Gallopin, G. (2006). *Los aspectos del desarrollo sostenible: Aspectos conceptuales y metodológicos*. Santiago, Chile: CEPAL.
- Gallopin, G. (2006). *Sostenibilidad del Desarrollo en América Latina y el Caribe: cifras y tendencias en Honduras*. Santiago, Chile: CEPAL, Nacione Unidas.

- Gordillo , C. (2010). *Situación actual y directrices para el manejo de tierras forestales de muy alta, alta y media captación y regulación hidrológica de Guatemala*. Guatemala: URL.
- Groot, R., Wilson, M., & Boumans, R. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* , 41, 393–408.
- GTZ. (2006). *Bases Conceptuales y Metodológicas para la Elaboración de una Guía Nacional de Ordenamiento Territorial* . Lima, Perú: GTZ.
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). *International Journal of Climatology*(25), 1965–1978.
- Hijmans, T., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 25, 1965–1978.
- Holdridge. (1971). *Ecología basada en Zonas de Vida*. Turrialba: ICTA.
- IARNA. (2009). *Evaluación de la sostenibilidad del desarrollo en Guatemala*. Guatemala: IARNA.
- IARNA. (2012). *Cambio climático en Guatemala. Un análisis con un enfoque ecosistémico*. Guatemala : IARNA. Universidad Rafael Landívar.
- IARNA/BANGUAT. (2009). *El sistema de contabilidad ambiental y económica integrada*. Guatemala: IARNA.
- IARNA-URL (Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landivar). (2011). *Cambio climático y biodiversidad. Elementos para analizar sus interacciones en Guatemala con un enfoque ecosistémico*. Guatemala 97, Guatemala : IARNA.
- IARNA-URL. (2005). *Situación del Recurso Hídrico en Guatemala. Documento Técnico del Perfil Ambiental* . Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landivar.
- IARNA-URL. (2010). *Perfil ambiental de Guatemala*. Guatemala : IARNA.
- IARNA-URL. (2012). *Perfil ambiental de Guatemala* . Guatemala : IARNA URL.
- IICA. (2003). *El Enfoque territorial del desarrollo rural*. San José, Costa Rica: IICA.
- INSIVUMEH. (2001). *Cuantificación del recursos hídrico*. Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología .
- IPCC. (2000). *Escenarios de emisiones. Reporte especial del IPCC. Resumen para responsables de políticas*. New York: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (2001). Cambio Climático 2001: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes del grupo de trabajo II. En I. P. Climático., *Resumen para responsables de políticas*

- Tercer Informe de Evaluación.* (pág. 80). Geneva, Switzerland: IPCC Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
- Jerneck, A., & Lenart, O. (2008). Adaptation and the poor: development, resilience and transition. *Climate Policy*, 8(2), 25-29.
- Jimenez, M. (2009). *Resiliencia de los ecosistemas naturales terrestres de Costa Rica al cambio climático*. Turrialba, Costa Rica : CATIE.
- King, D., Chandler, C., Rappole, J., Chandler, R., & Melham, D. (2012). Establishing quantitative habitat targets for a 'Critically Endangered' Neotropical migrant (Golden-cheeked Warbler *Dendroica chrysoparia*) during the non-breeding season. *Bird Conservation International*, 22(2), 213-221.
- Komar, O., McCrary, J., Van Dort, J., Cobar, A., & Castillejo, E. (2011). *Winter ecology, relative abundance and population monitoring of Golden-cheeked Warblers (Dendroica chrysoparia) throughout the known and potential winter range. Draft final report*. Chiapas: Salvanatura.
- Lagerroos, D. (2004). Sustainability seen through an integral lens. *World Futures*, 60, 319-325.
- Laukkonen, J., Kim Blanco, P., Lenhart, J., Keiner, M., Cavric, B., & Kinuthia-Njenga, C. (2009). Combining climate change adaptation and mitigation measures at the local level. *Habitat International*, 33, 287-292.
- Lindsay, D. (2008). Habitat fragmentation and genetic diversity of an endangered, migratory songbird, the golden-cheeked warbler (*Dendroica chrysoparia*). *Molecular Ecology*, 17, 2122–2133.
- Lugo, A. E., Brown, S. L., Dodson, R., & Smith, T. S. (1999). The Holdridge life zones of the conterminous United States in relation to ecosystem mapping. *Journal of Biogeography*, 1025-1038.
- Lyons, J. (1990). *Winter habitat survey of the Golden-cheeked Warbler (Dendroica chrysoparia) in Guatemala*. Washington.
- MDG Achievement Fund. (2010). *Metodología para el análisis de vulnerabilidad al cambio y a la variabilidad climática aplicada a un área piloto*. Bogotá, Colombia: MDG Achievement Fund.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005.). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington DC: Island Press.
- Mundial, B. (2010). *Grupo del Banco Mundial*. Recuperado el 02 de noviembre de 2012, de <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/BANCOMUNDIAL>
- Naciones Unidas. (2009). *Riesgo y pobreza en un clima cambiante*. Geneva: Naciones Unidas.
- Oudenoven, A., Petza, K., Alkemadeb, R., Heina, L., & de Groot, R. (2012). Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. *Ecological Indicators*, 21, 110-122.

- PNUD. (2011). *Programa de informes nacionales de desarrollo humano y de objetivos de desarrollo del milenio*. Recuperado el 02 de noviembre de 2011, de <http://desarrollohumano.org.gt/content/idh-en-guatemala>
- Pringle, C. (2001). Hydrolological connectivity and management of biological reserves: a global perspective. *Ecological Applications*, 4, 981–998.
- Quay, R. (2010). Anticipatory Governance. A tool for climate change adaptation. *Journal of the American Planning Association*, 476(4), 496-511.
- Rappole, J., King, D., & Leimgruber, P. (2000). Winter habitat and distribution of the endangered golden-cheeked warbler (*Dendroica chrysoparia*). *Birdlife*, 201-210.
- Renault Adib, A. (2010). *Guía para la formulación y gestión de planes de desarrollo rural sostenible. Un abordaje participativo con efoque de territorio*. Asunción, Paraguay: IICA.
- Rosito, J., & Rodas, O. (2005). *Programa de investigación de hidrología forestal*. Guatemala : INAB.
- Rottach, P. (2011). *Antecedentes y componentes de la Reducción del riesgo a desastres*. Alemania: Diakonie Katastrophenhilfe.
- Schuschny, A., & Soto, H. (2009). *Guía metodológica. Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible*. Santiago, Chile: CEPAL.
- Secretaría de ambiente y desarrollo sostenible . (2006). *Sistema de indicadores de desarrollo sostenible: República de Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Secretaría de ambiente y desarrollo sostenible de Argentina.
- SEMARNAT. (2011). *Identificación de reservas de agua potenciales para el medio ambiente en México*. Distrito Federal de México: SEMARNAT-WWF.
- SMEC Australia. (2007). *Climate change adaptation actions for local government* (Third ed.). Australia: Government of Australia.
- Turner, B., Kasperson, R., Matson, P., McCarthy, J., Corell, R., Christensen, L., . . . Kasperson, J. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. (PNAS, Ed.) *PNAS*, 100(14), 8074-8078.
- UNDP. (2002). *An adaptation policy framework. Capacity building for stage II adaptation*. New York: UNDP-GEF.
- UNFCCC. (2007). *Impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries*. Bonn, Germany: UNFCCC.
- USAID-MAGA. (2012). *Evaluación del potencial de aguas subterráneas de la República de Guatemala a escala de reconocimiento (1:250,000), como apoyo al desarrollo del riego agrícola en comunidades de pequeños y medianos productores* . Guatemala : USAID-MAGA.

- Vidal, R., Macías-Caballero, C., & Duncan, C. (1994). The occurrence and ecology of golden-cheeked warbler in the northern highlands of Chiapas, México. *Condor*, 96(3), 484-491.
- WMO. (2006). *Technical regulations: Hydrology*. New York: World Meteorological Organization .
- WMO. (2012). *El Tiempo el Clima y el Agua*. Gineva : OMM.
- Woodward, F., & Beerling, D. (1997). The dynamics of the vegetation change: health warnings for equilibrium 'dodo' models. *Global Ecology Biogeography Letters*, 6, 413–418., 413 - 418.

8. Anexos

Anexo 1. Aspectos legales e institucionales relacionados con la gestión de los ecosistemas terrestres reguladores del ciclo hidrológico. Una luz al final del túnel.

La ley forestal Decreto 101-96 en su capítulo 4, sobre definiciones expone que las zonas de recarga hídrica son áreas superficiales, asociadas a una cuenca determinada, que colectan y permiten la infiltración del agua hacia niveles freáticos y/o acuíferos.

El valor estratégico de éstas se identifica por el agua de saturación que es extraída eventualmente por el hombre para sus diferentes actividades productivas. En este sentido, se puede interpretar que, las zonas de recarga hídrica son todas las áreas del país que presentan altas tasas de infiltración.

El artículo 47 de esta ley acerca de “cuencas hidrográficas” menciona que “se prohíbe eliminar el bosque en las partes altas de las cuencas hidrográficas cubiertas de bosque, en especial las que estén ubicadas en zonas de recarga hídrica que abastecen fuentes de agua, las que gozarán de protección especial. En consecuencia, estas áreas sólo serán sujetas a manejo forestal sostenible”. El mismo artículo afirma que “en el caso de áreas deforestadas en zonas importantes de recarga hídrica, en tierras estatales, municipales o privadas, deberán establecerse programas especiales de regeneración y rehabilitación”.

A partir de lo anterior nace la necesidad de contar con un concepto que relacione el complejo agua-suelo-bosque para la administración forestal en Guatemala. El espíritu –intención– del concepto de zona de recarga hídrica, según la academia de las ciencias forestales y la ley forestal, se refiere a aquellas zonas que poseen mejores condiciones relativas para la infiltración por el hecho de tener cobertura forestal versus las mismas zonas biofísicas sin el bosque.

Para la administración forestal en Guatemala, especialmente en las atribuciones de autorización de permisos forestales vinculados con aprovechamientos forestales, es fundamental saber cuándo se está exponiendo un suelo a la erosión grave e irreversible y es en este campo que la definición de recarga hídrica resulta una tarea clave.

En ese sentido, el INAB desarrolló el “concepto de Tierras Forestales de Captación y Regulación Hidrológica (TFCRH), como aquellas tierras con aptitud preferentemente forestal, para protección o para realizar manejo forestal o agroforestal sostenible, y que son de alta importancia por la cantidad y calidad de agua que incorporan a sistemas hidrológicos locales (cuenca de captación) (Rosito & Rodas, 2005)

Constituyen sitios de regulación hidrológica, con efectos en el comportamiento de sistemas de drenaje superficial o subterráneos”.

Bajo el concepto del INAB, las TFCRH, de manera general, se encuentran asociadas a condiciones severas en cualquiera los factores limitantes o modificadores de la capacidad de uso del suelo, material parental, características físicas (textura y estructura), pendiente, profundidad efectiva y drenaje. En estas tierras un uso que excede la máxima capacidad productiva del suelo conlleva su degradación (erosión química y física a niveles insostenibles) y la pérdida de su capacidad reguladora del ciclo hidrológico, especialmente

la capacidad de infiltración, almacenamiento y distribución paulatina y equilibrada en el tiempo del agua.

Las TFCRH, asociadas a bosques, presentan las siguientes características hidrológicas:

- Alta infiltración, la cual, puede verse favorecida por la presencia de una o la interacción de varias de las siguientes condiciones:
 - Incremento de la precipitación orográfica debido a la condensación de la humedad.
 - Incremento de la precipitación neta por efecto de la precipitación horizontal.
 - Incremento de la humedad relativa
 - Disminución de la temperatura
 - Disminución de evapotranspiración.
 - Alta permeabilidad o infiltración del suelo.
- Ubicación potencialmente propicia para alimentar áreas de descarga hídrica (manantiales y drenajes superficiales) o drenajes subterráneos utilizables. En este sentido, se podrán considerar TFCRH prioritarias, aquellas que abastecen a comunidades o sistemas socio-productivos importantes para el país (sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano, sistemas de riego, industria, minería, entre otros) (Rosito & Rodas, 2005).

La ley de Áreas Protegidas (Decreto 101-86) crea el sistema de conservación de Bosques Pluviales. A continuación se cita textualmente ARTÍCULO 13: Fuentes de agua. Como programa prioritario del "SIGAP", se crea el Subsistema de Conservación de los Bosques Pluviales, de tal manera de asegurar un suministro de agua constante y de aceptable calidad para la comunidad guatemalteca. Dentro de él podrá haber reservas naturales privadas. En este sentido el CONAP ha desarrollado la creación de áreas protegidas con objetivos específicos de la conservación de fuentes de agua. Sin embargo, no se ha creado un sistema específico de bosques pluviales.

Cada una de las vertientes se subdivide en cuencas (ver fig. 1), las cuales son áreas tributarias de un río, es decir que es toda el área drenada por un río. Los límites de una cuenca se obtienen de la topografía del lugar. En las siguientes tablas, aparece una lista de las cuencas en que se divide Guatemala.

Capítulo VI

Conclusiones generales

Conclusiones

Se evidenciaron grandes diferencias entre las tres regiones hidrológicas definidas para la RBSM. Las subcuencas de sotavento, Pasabien y Teculután, presentan hidrología y rendimiento hídrico similar. Se determinaron recargas contrastantes entre la parte alta y baja de estas subcuencas (desde 3,000 mm a 0 mm, respectivamente).

La subcuenca de la región hidrológica de transición, San Jerónimo, presenta valores relativamente bajos en cuanto a lámina de recarga hídrica, de 576 mm. Esta subcuenca presenta la disponibilidad hídrica más baja, la cual es de 675 mm (47% de la lluvia total).

La subcuenca Pueblo Viejo ubicada en barlovento tiene la mayor precipitación promedio (3,800 mm) y una lámina mayor a 2000 mm de recarga.

La recarga hídrica muestra alta correlación con la lámina de lluvia anual. Se definió que la zona núcleo de la RBSM recarga un promedio superior a 1,000 mm (equivalente 10,000 m³/ha), llegando a valores máximos cercanos a los 3,000 mm.

Se determinó que la erosión hídrica es un proceso biofísico que muestra una tendencia a aumentar significativamente en zonas con mayor precipitación y que son relativamente menos favorables para la recarga hídrica.

Los procesos de erosión son altamente diferenciados en las tres regiones hidrológicas definidas para la RBSM. La región hidrológica con mayores valores de erosión es barlovento (Pueblo Viejo), con un promedio de 20 Ton/ha/año. La subcuenca con menor erosión es la de Teculután, situada en Sotavento, con cerca de 5 Ton/ha/año.

Los métodos de estimación de recarga hídrica, propuesto por Schosinsky y la estimación de la erosión hídrica potencial con la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE) dieron resultados satisfactorios para fundamentar el análisis biofísico de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica en condiciones climáticas e hidrológicas contrastantes.

Partiendo de esta información es posible sustentar directrices para la conservación de los servicios ecosistémicos y gestión de la RBSM.

El monitoreo y análisis ecohidrológico en años climáticos extremos es útil para establecer relaciones entre los ecosistemas y sus funciones relacionadas con los servicios de regulación hidrológica que proveen a la sociedad.

Se logró definir satisfactoriamente indicadores para la evaluación de la efectividad y rendimiento de los servicios ecosistémicos de regulación hidrológica que proveen.

El Bosque nuboso es crítico para la recarga hídrica y la regulación del caudales de estiaje (flujo básico), siendo esto aún más importante en años hidrológicos secos. El ecosistema de bosque de pino-encino, es crítico para la regulación de caudales máximos y erosión, especialmente durante eventos extremos de precipitación.

El sistema de contabilidad ambiental y económica respaldado con principios e información ecohidrológica, demostró ser muy útil para analizar de una manera balanceada y objetiva, el servicio ecosistémico de regulación hidrológica en las cuatro subcuencas estudiadas.

Destaca la importancia socioeconómica que representan los ecosistemas de bosque nuboso (UMCF) por los servicios ecosistémicos de recarga hídrica y regulación de caudales mínimos. Las mayores necesidades de conservación y restauración de estos ecosistemas se presentan en las regiones hidrológicas de sotavento y de transición.

La subcuenca Teculután presenta el mayor uso consumtivo del agua (tanto bruto como per cápita), y mayor rendimiento monetario por el uso consumtivo del agua. Así mismo Pasabien y San Jerónimo destacan por presentar muy altas proporciones de uso no consumutivo, sumando ambos usos cerca del 100 % de su caudal superficial. Al mismo tiempo presentan menor cobertura relativa de bosque nuboso.

Se evidenció alta dependencia y productividad del sector económico basado en el uso del agua con ingresos brutos de entre 80 y 100 millones de quetzales (entre 10 y 12.5 millones de dólares americanos). Para garantizar estos beneficios y dinámica económica es necesario fortalecer la gestión, especialmente de los ecosistemas de bosque nuboso (UMCF) y, complementariamente, del bosque de pino encino.

Esta cuantificación económica subestima la realidad ya que se encontraron vacíos de información importantes, entre los que destacan el uso del agua subterránea y los beneficios económicos derivados de los usos industriales.

A partir del conocimiento adquirido en las subcuencas estudiadas se elaboró un índice de captación y regulación hidrológica (ICRH). Este fue aplicado al conjunto de microcuencas de Guatemala para priorizar aquellas más importantes en la provisión de servicios ecosistémicos de regulación hidrológica.

La agrupación de las categorías 1, 2 y 3 integra 458 microcuencas con la mayor puntuación respecto al ICRH, las cuales suman una extensión territorial de 1.7 millones de hectáreas equivalente al 16% del territorio nacional. Se estima que de manejarse adecuadamente este territorio es posible garantizar la captación de al menos el 26% de la disponibilidad hídrica nacional. Esto es equivalente a 23,000 millones de m³ de agua.

La gestión adecuada de este grupo de 458 microcuencas, además, es crítica para la regulación del flujo hídrico de ciclo corto y para mantener la capacidad productiva de los suelos, ya que se evita la pérdida de cerca 350 Toneladas métricas (Ton) / ha / año de suelo.

La conservación de estas unidades hidrológicas es crítica, además, por su ubicación estratégica para el sistema socioecológico de Guatemala. Por ejemplo el 70% de su extensión está ubicada dentro áreas protegidas, que por sus dimensiones y estado de conservación, se pueden considerar como las más importantes de Guatemala, tal como la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas.

Esta propuesta de clasificación de microcuencas resulta aún más importante y pertinente de desarrollar en el marco de la necesidad de llenar vacíos de información científica respecto de recursos hídricos para la adaptación al cambio climático.