CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
ESCUELA DE POSGRADO

Análisis hidrológico ante impactos del cambio climático y cambios de uso del suelo en la cuenca del río Compasagua, Nicaragua

Por

Tulio Wilfredo Chávez Espíritu

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado
como requisito para optar el grado de

Magister Scientiae en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Turrialba, Costa Rica, 2012

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

***MAGISTER SCIENTIAE* EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

FIRMANTES:

Jorge Faustino, Ph.D.
Director de tesis

Muhammad Ibrahim, Ph.D.
Miembro Comité Consejero

Diego Tobar, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Christian Brenes, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Thomas Dormody, Ph.D. / Francisco Jiménez, Dr. Sc.
Decano / Vicedecano de la Escuela de Posgrado

Tulio Wilfredo Chávez Espíritu
Candidato

II

DEDICATORIA

A Dios por darme todas las bendiciones, a mí querida esposa por darme las fortalezas en los momentos más difíciles, a mí soñado y querido hijo que viene en camino. A mí querida madre por darme la vida y forjarme en el estudio.

AGRADECIMIENTOS

A la Ford darme la oportunidad en realizar mis estudios de posgrados, gracias por confiar en mi persona, y mi retribución será en la búsqueda de estrategias y acciones que contribuya el desarrollo de mi país.

Al PhD. Jorge Faustino por sus sabios consejos, gracias profesor por sus grandes enseñanzas, todavía me queda mucho por aprender de usted. Al MSc. Diego Tobar, gracias por tu comprensión y sabios consejos, al MSc. Christian Brenes, también te agradezco infinitamente por tu paciencia y orientación en el trabajo, no solamente fueron buenos consejeros de tesis, sino también grandes amigos.

Al PhD, Muhammad Ibrahim, profesor gracias por su apoyo en la ejecución en mi trabajo.

Al MSc. Cristobal Villanueva, te agradezco infinitamente por apoyarme en mi trabajo y por tu valiosa amistad.

Al Dr. Francisco Jimenez, por brindarme su orientación en mi trabajo y por ser un gran amigo.

Al MSc. Martin Mena, Ing. Marco Lopez y MSc. Almilcar Aguilar, gracias por apoyarme en los trabajos de campo, y por la amistad grandiosa que perdura por siempre.

A mis amigos de AMUPNOR, Verónica, Eduardo, Miguel y Narciso, los doy gracias por su apoyo y amistad.

A mis amigos Erick Rajiv, Luis Velásquez, Lupita, Valenzuela, Chele, Morena, Coco, Sugeylis, gracias por su amistad y por el calor familiar que no olvidare del hermoso y recordado municipio de Muy Muy.

BIOGRAFÍA

El autor nació en Pozuzo, Oxapampa, Perú el 09 de octubre de 1981. Se graduó como Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Mención en Conservación de Suelos y Agua, en la Universidad Nacional Agraria de la Selva en el 2007. Trabajo en los años de 2008 -2010, como especialista en Sistema de Información Geográfica y Percepción Remota, en la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, Autoridad Nacional del Agua, Huaraz. En el 2011, ingresó a la Escuela de Posgrado del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Costa Rica, para realizar la maestría en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, concluyendo en diciembre del 2012.

CONTENIDO

DEDICATORIA IX
AGRADECIMIENTOS IX
BIOGRAFÍA IX
RESUMEN IX
SUMMARY X
ÍNDICE DE CUADROS XI
ÍNDICE DE FIGURAS XII
LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS XIII
1 INTRODUCCIÓN 1
1.1 Objetivos del estudio 2
1.1.1 Objetivo general 2
1.1.2 Objetivos específicos 2
1.2 Preguntas de investigación 2
1.2.1 Objetivo 1 2
1.2.2 Objetivo 2 3
2 MARCO CONCEPTUAL 3
2.1 La hidrología en la cuenca 3
2.2 Modelación hidrológica 4
2.3 Cambios de uso del suelo 4
2.4 Cambio climático 5
2.5 Mitigación y adaptación al cambio climático 7
2.6 Sistemas de información geográfica (SIG) aplicados al recurso hídrico 8
2.7 Modelos de cambio de uso del suelo 8
2.7.1 Cadenas de Markov 8
2.7.2 Cellular Automata 9
2.8 Modelo hidrológico 9
2.8.1 SWAT 9
2.9 Bibliografía 11
3 Articulo I. Análisis del cambio de uso del suelo (1980-2010) y su predicción futura mediante modelos estocásticos, en la cuenca del río compasagua, nicaragua 1
3.1 Resumen 1
3.2 Introducción 1
3.3 Materiales y métodos 3
3.3.1 Área de estudio 3
3.4 Procedimiento metodológico 4

3.4.1 Corrección geométrica de imágenes de satélite y ortorectifación de fotografías aéreas 4
3.4.2 Elaboración de mapas de uso del suelo 4
3.4.3 Elaboración de la matriz de transición y Modelación de escenarios 5
3.5 Resultados 7
3.5.1 Evaluación de los cambios de uso del suelo 7
3.5.2 Matriz de transición de uso del suelo 8
3.5.3 Pérdidas y ganancias de uso del suelo para 1980-10 9
3.5.4 Modelación para escenarios de uso del suelo para el 2030 12
3.5.5 Análisis de probabilidades de transición para el 2030 12
3.5.6 Matriz de transición de uso del suelo para el año 2030 13
3.5.7 Pérdidas y ganancias de uso del suelo para 2010-30 14
3.6 Discusiones 16
3.7 Conclusiones 17
3.8 Recomendaciones 18
3.9 Bibliografía 19
4 Articulo II. Impactos del cambio climático y cambios de uso del suelo en la cuenca del río compasagua, nicaragua 1
4.1 Resumen 1
4.2 Introducción 2
4.3 Área de estudio 3
4.3.1 Localización del área de estudio 3
4.4 Procedimiento metodológico 4
4.4.1 Preparación de datos para el SWAT 4
4.4.2 Ingreso de datos de uso del suelo 4
4.4.3 Ingreso de datos de suelo 5
4.4.4 Ingreso de datos de clima 5
4.4.5 Escenario de cambio climático y demanda futura del agua 5
4.4.6 Cambios de uso del suelo 6
4.4.7 Modelación y cálculos de los componentes hidrológicos 7
4.4.8 Comparación del caudal base estimado por SWAT y con mediciones en campo 8
4.5 Resultados 9
4.5.1 Evaluación de los cambios de uso de suelo 9
4.5.2 Impactos con escenarios de cambios de uso de suelo 10

4.5.3 Impactos con escenarios de cambio climático 13
4.5.4 Impactos con escenarios de cambio climático y manejo de la cuenca 16
4.5.5 Impactos del cambio climático y ZEE en la disponibilidad y demanda futura del agua 19
4.6 Discusión 20
4.7 Conclusiones 23
4.8 Recomendaciones 24
4.9 Bibliografía 25

RESUMEN

Se evaluó los impactos en los componentes del balance hidrológico y erosión afectados por los cambios de uso del suelo y el cambio climático, en la cuenca del río Compasagua, Muy Muy, Nicaragua. Los cambios de uso del suelo de 1980, se determinaron a partir de la ortorectificación y fotointerpretación de fotografías aéreas a escala 1:40 000; además, se utilizó la información de mapas de uso del suelo del 2010 y de zonificación ecológica económica (ZEE) generados a partir de imágenes de satélite SPOT (2.5 m) y cartografía a escala 1:50 000 por la Asociación de Municipios Productivos del Norte (AMUPNOR). Los mapas de uso del suelo para el 2030 se han obtenido mediante la modelación con cadenas de markov y cellular automata, con el propósito de evaluar la transición y tendencias del cambio de uso del suelo. Para el análisis hidrológico se realizó mediante la aplicación de la herramienta Soil and Water Assessment Tools (SWAT) integrado en el software ArcGis ver 10, por el cual se ha utilizado la información climática de 10 años (2000-10) registradas por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), asimismo la información de la variación anual de la precipitación y temperatura por efectos del cambio climático generados por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) a nivel de Nicaragua con diferentes modelos (GFLDR30, ECHAM4 y HADCM3), para lo cual se modelo la información con escenario más pesimista (A2). Los resultados mostraron que los cambios de uso del suelo han variado en diferentes periodos, siendo la de mayor transición de pastos sin árboles a pastos con árboles dispersos en más de 700%, y se muestra la misma tendencia para los próximos 20 años en 21%. No obstante, esta dinámica han mostrado mejores condiciones hidrológicos para los usos de 2010 y 2030; pero los componentes hidrológicos como la recarga de acuíferos, la escorrentía superficial y la erosión se muestran más sensibles al cambio climático, que al cambio de uso del suelo, de modo que pequeñas alteraciones en la reducción e incremento en la precipitación y temperatura afectan muy severamente a la cantidad de la producción de agua entre 49% y -25% con respecto a los escenarios sin cambio climático. Además de analizó los impactos del cambio climático con las propuestas de ZEE, que involucra las mejores prácticas agrícolas y ganaderas en la cuenca, los que mostraron una disminución en la producción de sedimento en 39% con base al uso del 2030.

En conclusión el cambio climático va tener los mismos impactos con escenarios de manejo (ZEE) y sin manejo, pero con la ZEE, se pueden crear mejores condiciones para mitigar los impactos en la erosión y la producción de agua, de modo que las propuesta de manejo deben complementarse con estrategias de la gestión integrada del recurso hídrico, para adaptarse exclusivamente a climas más desfavorables como en la reducción de la precipitación que estiman los modelos (HADCM3 y ECHAM4).

Palabras clave: SWAT, uso de suelo, cambio climático, recarga de acuífero, sedimentos, escorrentía.

SUMMARY

We evaluated changes in land use and climate change in the Compasagua watershed, Muy Muy, Nicaragua and its impacts on the components of water stability and erosion. Changes in land use in 1980, were determined through orthorectification and photointerpretation of aerial photographs at a scale of 1:40 000, we also used information from the 2010 land use maps and Ecological Economic Zones (EEZ) generated from SPOT satellite imagery (2.5 m) and maps at a scale of 1:50 000, for the Association of Productivity of North Municipalities (AMUPNOR). The land use maps for 2030 were obtained by modeling using markov chains and cellular automata, in order to evaluate the transition and change in trends in land-use. The hydrological analysis, was performed by applying the Soil and Water Assessment Tools (SWAT) built into the ArcGis (10 version) software, for which we used 10 year climate data (2000-10) recorded by the Nicaraguan Institute for Territorial Studies (INETER), also details on annual variation in precipitation and temperature generated by the Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), to asses effects of climate change at the Nicaraguan level with different models (GFLDR30, ECHAM4 and HADCM3), for which acquired information was modeled with a more pessimistic scenario (A2). The results showed that changes in land use have changed during different periods, with the highest transition from open pastures to grasslands with scattered trees over 700%, and shows the same trend for the next 20 years by 21 %. Notwithstanding, this change in dynamics have shown improved hydrological conditions in used from 2010 and 2030, but the hydrological components such as groundwater recharge, surface runoff and erosion are more sensitive to climate change, than change in land-use, resulting in small changes in the reduction and increase in temperature and precipitation severely affecting the amount of water produced between 49% and -25% compared to scenarios without climate change. Also when analyzing the impacts of climate change with the proposed EEZ, involving best farming practices in the watershed, this showed a decrease in sediment yield 39% based on land use from 2030.

In conclusion, climate change will have the same impact with management scenarios (EEZ) and without management, but better conditions for mitigating impacts on erosion and water production can be obtained with the EEZ, as such that management strategies proposal should be complemented by integrated management of water resources, to exclusively adapt to unfavorable climates such as reduction in precipitation as estimated by these models (HADCM3 and ECHAM4).

Keywords: SWAT, climate change, aquifer recharge, runoff and sediment yield.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Cambios proyectados en temperatura y precipitación para Nicaragua (B2)..... 6
Cuadro 2. Cambios proyectados en temperatura y precipitación para Nicaragua (A2) 6
Cuadro 3. Categorías de uso identificados en la zona de estudio con base a criterios de FAO(2000) y Gallego(2002) 6
Cuadro 4. Cambios de uso del suelo para los diferentes periodos 1980-10 8
Cuadro 7. Probabilidades de transición esperada de uso del suelo para el 2030..... 13
Cuadro 8. Matriz de transición esperada de uso del suelo para el 2010-2030 (hectáreas)..... 13
Cuadro 9. Datos usados en el SWAT para modelación de cada escenario de uso suelo..... 4
Cuadro 10. Tipo de coberturas usadas en el SWAT por clasificación de usos de suelo 4
Cuadro 11. Cambios en temperatura y precipitación para el 2030 en Nicaragua (A2) 6
Cuadro 13. Comparación de uso del suelo en diferentes periodos 9
Cuadro 14. Impactos del cambio del uso del suelo en el promedio anual de los componentes del balance hídrico (mm/año) y producción de sedimentos (tn/ha/año)..... 10
Cuadro 15. Impactos del cambio climático en el promedio anual de los componentes del balance hídrico (mm/año) y producción de sedimentos (tn/ha/año)..... 13

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio..... 3
Figura 2. Diagrama del proceso metodológico de la dinámica espacial..... 7
Figura 3. Análisis de las pérdidas y ganancias de usos del suelo para 1980-10..... 10
Figura 4. Mapas de pérdidas y ganancias de usos del suelo para 1980-10..... 10
Figura 5. Principales transiciones de superficies de uso de suelo entre 1980 (a) y 2010(b) .. 11
Figura 6. Análisis de las pérdidas y ganancias de usos del suelo para 2010-30..... 14
Figura 7. Mapas de pérdidas y ganancias de usos del suelo para 2010-30..... 14
Figura 8. Dinámica de cambios de uso del suelo en 1980, 2010 y 2030..... 15
Figura 9. Ubicación del área de estudio..... 3
Figura 10. Mapa de tipo de suelo..... 5
Figura 11. Promedio mensual de caudal base de 10 años (2000-10) mediante SWAT..... 9
Figura 12. Variación porcentual en los niveles de recarga de acuífero..... 11
Figura 13. Promedio anual de recarga de acuífero y producción de sedimentos (A1,A2) 2030, (B1, B2) 2010, (C1,C2) 2030 12
Figura 14. Variación porcentual en los niveles de recarga de acuífero..... 14
Figura 15. Promedio anual de recarga de acuífero y producción de sedimentos (A1,A2) 2030, (B1, B2) GFDLR30, (C1,C2) ECHAM4, (D1,D2) HADCM3 15
Figura 16. Variación porcentual en los niveles de recarga de acuífero..... 17
Figura 17. Promedio anual de recarga de acuífero y producción de sedimentos (A1,A2) 2030, (B1, B2) GFDLR30, (C1,C2) ECHAM4, (D1,D2) HADCM3 18
Figura 18. Comportamiento mensual de la disponibilidad de agua con cambio climático 19
Figura 19. Comportamiento mensual de la disponibilidad de agua con manejo de la cuenca y cambio climático..... 20

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

AMUPNOR: Asociación de Municipios Productivos del Norte

CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe

DEM: Modelo de Elevación Digital

GPS: Sistema de Posicionamiento Global

IPCC: Intergovernanmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental de Cambio Climático)

INAB: Instituto Nacional de Bosques

INETER: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales

IFSAR: Interformetric Synthetic Apertura Radar (Sistema Radar de Apertura Sintética Interferométrico)

LIDAR: Light Detection and Ranging (Detección y Medición a través de la Luz)

SIG: Sistema de Información Geográfica

SWAT: Soil and Water Assessment Tools (Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua)

ZEE: Zonificación ecológica y económica

1 INTRODUCCIÓN

En Nicaragua el sector agropecuario desempeña un papel importante dentro de la actividad económica y la producción de alimentos (CEPAL 2010a). No obstante, su crecimiento económico ha tenido una relación muy directa en la reducción de los bosques, a medida que se han ampliado más áreas de pasturas para la ganadería extensiva (Brown et al. 2000). Por lo tanto, en los últimos periodos en la zona de estudio se han experimentado cambios en los diferentes uso del suelo, por el incremento de la ganadería, a causa de la demanda de carne y leche de empresas nacionales; por otro lado, la extracción de las especies forestales maderables, la agricultura migratoria fueron otros agentes trascendentales que incidieron en la reducción de los bosques (MAGFOR 2005; ODESAR 2008). Además, estudios recientes de modelación de cambios de uso del suelo a nivel nacional, estiman para el año 2100, un incremento del área de agricultura y pastoreo en más de 70%, que producirían la disminución de los arbustos/sabanas en 90%, y los bosques tropicales en 40% (CEPAL 2011).

Por otra parte, estudios recientes sobre el impacto del cambio climático a escala nacional, determinaron que la disponibilidad de agua para el 2100 pueden presentar una reducción de 63%, si no se toma ningunas medidas de gestión del agua (CEPAL 2010b). Mientras tanto, los problemas la calidad y cantidad del agua se presenten afectadas a causa de las actividades agropecuarias (cambios de uso) y que podrían verse empeorado con los impactos del cambio climático (CEPAL 2011).

Analizar escenarios históricos de cambio de uso de suelo es importante para comprender los vínculos entre los procesos socioeconómicos y el manejo de los recursos naturales (Turner y Meyer 1991); además, con la nuevas tecnologías de percepción remota se puede cuantificar de manera rápida (Brown et al. 2000); así mismo, las nuevas herramientas tecnológicas como los modelos estocásticos (markov y cellular automata) son útil para evaluar la dinámica espacial a partir de una matriz de transiciones de coberturas (Aaviksoo 1993; Weng 2002; Ruiz Benito et al. 2010; Kamusoko et al. 2011);además, estos modelos presenta resultados fiables para simular los cambios de uso futuro (Aaviksoo 1993; Soares-Filho et al. 2004; Teixeira et al. 2009), por lo que proporcionan información visual y cuantitativa (Soares-Filho et al. 2004) que pueden utilizarse para la gestión del territorio (Ruiz Benito et al. 2010). Mientras tanto, la modelación hidrológica nos permite dar una vista más comprensiva de los impactos de estos cambios de uso en el recurso hídrico, de modo que proporciona una amplia gama de factores para ser considerados en la gestión del recurso hídrico como en el uso presente y futuro.

Pero no todos los modelos hidrológicos, tienen capacidades de analizar alternativas para una adecuada gestión del agua, que permita contribuir a tomar decisiones para la intervención, mediante la estimación de tendencias y escenarios del clima y cambios de uso del suelo sobre el recurso hídrico (Notter et al. 2007). Sin embargo, los pronósticos de

variaciones climáticas son relevantes para una buena planificación del recurso hídrico (Candela et al. 2009); pero el comportamiento de las futuras condiciones hidrológicas requieren de la comprensión de los efectos combinados de los cambios del clima y el cambio de uso del suelo (Juckem et al. 2008). Por lo tanto, estudios hidrológicos se han vuelto una necesidad para desarrollar proyectos sostenibles, de modo que pueda entenderse como podría verse afectada el recurso hídrico con las actuales variaciones del clima, ante un crecimiento de explotación de agua subterránea, escasez de agua superficial, cambios de uso de suelo, crecimiento económico, etc. Inclusive, evaluar los impactos con supuestos alternativos de manejo de la cuenca, para un mejor diseño de estrategias de adaptación al cambio climático y la gestión integrada del recurso hídrico. La utilización del modelo Soil and Water Assessment Tools (SWAT) nos permite hacer estas evaluaciones por su amplia variedad de condiciones ambientales que utilizan (Arnold y Fohrer 2005; White y Chaubey 2005; Li et al. 2009)

El objetivo de esta investigación consiste en evaluar y analizar las principales causas que influyen en la dinámica espacial de los cambios de uso de suelo y como afectan en la respuesta hidrológica de la cuenca, además con la propuesta de manejo y posibles cambios climáticos. De modo que esta información contribuya para una gestión integrada del recurso hídrico

1.1 Objetivos del estudio

1.1.1 Objetivo general

Contribuir al conocimiento de la relación entre los impactos del cambio climático y cambios de uso del suelo sobre la hidrología de la cuenca del río Compasagua, para la gestión integrada del recurso hídrico.

1.1.2 Objetivos específicos

1) Determinar la dinámica de cambios de uso del suelo en diferentes períodos (1980, 2010 y 2030) en la cuenca del río Compasagua, Nicaragua.
2) Analizar los impactos asociados de escenarios de cambios de uso del suelo, cambio climático y manejo de la cuenca

1.2 Preguntas de investigación

1.2.1 Objetivo 1

* ¿Qué actividades socioeconómicas son las que influyen en los cambios de uso del suelo en la cuenca del río Compasagua?

* ¿Cuántas son las áreas deforestadas para actividades agrícolas y ganaderas en los últimos periodos?
* ¿Cuáles será la tendencia para el 2030 de los cambio de uso del suelo?

1.2.2 Objetivo 2

* ¿Cuáles son los impactos de cambios de uso del suelo en la hidrología de la cuenca y producción de sedimentos?
* ¿Cómo afectarán los cambios futuros (2030) de uso del suelo combinado con los escenarios del cambio climático en la hidrología de la cuenca y producción de sedimentos?
* ¿Cuál será la respuesta hidrológica con el manejo de la cuenca ante los escenarios de cambio climático?
* ¿Cuánto será la disponibilidad de agua en la cuenca ante el efecto del cambio climático?
* ¿Cuáles pueden ser las estrategias y recomendaciones para la planificación del recurso hídrico?

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 La hidrología en la cuenca

El clima de una cuenca hidrográfica proporciona las entradas de humedad y energía, que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. De modo que cuando se produce una precipitación, esto puede ser interceptado y contenido en el dosel de vegetación o caer a la superficie del suelo, y esto se infiltra en el perfil del suelo o fluirá sobre el terreno como escorrentía, moviéndose hacia un cauce y contribuyendo la formación de los ríos. Por otra parte, el agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada o puede avanzar lentamente al sistemas de aguas subterráneos (Neitsch *et al.* 2005).

La evapotranspiración es un término colectivo para todos los procesos en el que el agua en la fase liquida o sólida o cerca de la superficie terrestre se convierte en vapor atmosférico. Los que incluye la evaporación de ríos y lagos, suelos desnudos, y superficies vegetativas; principalmente por efecto de la temperatura del suelo y el aire (Neitsch *et al.* 2005).

Por otra parte, el agua subterránea se forma principalmente a través de la infiltración/percolación, también puede ocurrir la recarga por filtración de cuerpos de aguas superficiales. El agua subterránea puede dividirse en dos sistemas de acuíferos: un acuífero superficial y libre (acuífero no confinado), cuyo límite es nivel freático, que contribuye al flujo

de regreso a la corrientes dentro de la cuenca hidrográfica y un acuífero profundo y limitado(acuífero confinado) es aquel que está delimitado por encima y abajo por formaciones geológica, que contribuye al flujo de regreso a las corrientes fuera de la cuenca (Arnold *et al.* 1993; Neitsch *et al.* 2005) .

Los acuíferos se recargan principalmente a través de la precipitación en suelos con alta capacidad de infiltración o rocas superficialmente permeables. Las áreas de recarga de los acuíferos pueden o no estar a grandes distancias de donde son explotados. Las áreas donde haya recarga hídrica son las más importante de conservar, tanto en sus características físicas de permeabilidad como en su susceptibilidad a recibir contaminación y afectar la calidad de las aguas subterráneas. Las montañas y zonas de alta precipitación y suelos permeables, por lo general son áreas de recarga hídrica importantes (INAB 2003); asimismo, la recarga potencial de las aguas subterráneas se logran con un manejo adecuado del suelo (Juckem *et al.* 2008).

2.2 Modelación hidrológica

Se define como la descripción matemática de la respuesta de una cuenca ante la ocurrencia de una parte de eventos de precipitación. Así mismo, un modelo hidrológico es definido como un sistema matemático o físico que obedece a ciertas condiciones específicas y cuyo comportamiento es utilizado para entender un sistema físico, biológico o social (Solis *et al.* 1993).

2.3 Cambios de uso del suelo

El cambio de uso del suelo, consiste en la transición de una categoría por otra, como es el caso la deforestación, la expansión agrícola o el cambio en la extensión urbana, y está en función: de la presión (población de usuarios de los recursos), oportunidades (precios de mercado, costos de producción, costos de transporte y tecnología), políticas (subsidios, impuestos, derecho de propiedad, infraestructura), vulnerabilidad (exposición a las perturbaciones externas, sensibilidad y capacidad de resistencia), y la organización social (acceso a los recursos, distribución del ingreso, características de los hogares, y las interacciones urbano-rurales); estas funciones tienen una fuerte interacción que causan el cambio de uso del suelo (Lambin *et al*. 2003).

Los impactos de cambios de uso del suelo pueden presentarse mediante las variaciones estacionales sobre la hidrología de la cuenca, y su equilibrio están en función a la distribución de la vegetación y su interacción con el agua y el suelo, cualquier alteración se modifica el ciclo hidrológico (Guo *et al.* 2008; Juckem *et al.* 2008; Li *et al.* 2009). Asimismo, la conversión de los bosques para agricultura o pastos, pueden reducir los caudales de los ríos en estaciones secas y se intensifican en estaciones de invierno; estos cambios de uso del suelo agravan los problemas relacionados con la escasez del agua en periodos de sequía y la erosión

de las laderas en estaciones lluviosos (Notter *et al.* 2007; Guo *et al.* 2008; Mango *et al.* 2011), de modo que la conversión de la superficie forestal para cultivos o pastizales, incrementan la escorrentía superficial anual (11% o 59%) y provocan fuertes inundaciones; por otra parte la disminución de los caudales es probable que se debe a una intensa deforestación en las partes altas de la cuenca (Notter *et al.* 2007). No obstante, algunos estudios muestran que la disminución del agua puede estar más afectada por la variabilidad climática (influye en 77%) que por el cambio de uso del suelo (influye en 18%), de manera que el cambio del clima juega un rol importante que influye en la hidrología de la cuenca; sin embargo, la relación de la extensión de los cambios de uso del suelo pueden ser otro factor determinante (Li *et al.* 2009). Asimismo, un impacto en el balance hídrico pueden disminuir en más 9% de las descargas de las aguas subterráneas y en el 3% del total de producción de agua superficial (Mango *et al.* 2011).

2.4 Cambio climático

El cambio climático es la alteración de la composición de la atmosfera mundial, debido a cambios internos del sistema climático o de la interacción de sus componentes, atribuidos por causas naturales o actividades humanas (IPCC 2000), de modo que afecta directamente a las funciones de los organismos individuales, modifica las poblaciones, y afecta a la estructura y función del ecosistema (ciclo de nutrientes, flujo del agua, composición y distribución de las especies) (IPCC 2002).

En los últimos años la temperatura media de la superficie de la tierra ha aumentado en 0,6°C, siendo el año 1998 el más cálido de la década (IPCC 2002). No obstante, el mayor aumento de temperaturas ha tenido lugar en latitudes medias y altas de los continentes del norte; los suelos se han calentado más que los océanos y las temperaturas nocturnas más que las diurnas (IPCC 2002).

En el cuadro 1 y 2, se presentan los resultados de escenarios de cambio climático en temperatura y precipitación generados a nivel de Nicaragua según el escenario B2 (que hace alusiones a un mundo basado en soluciones locales para la sostenibilidad socioeconómica y ambiental) y A2 (se mantiene igual el crecimiento económico y poblacional) con los modelos HADCM3, GFDLR30 y ECHAM4 (CEPAL 2011).

Cuadro 1. Cambios proyectados en temperatura y precipitación para Nicaragua (B2)

Modelos	Cambios en temperatura °C		
	2030	2050	2100
HADCM3	1.2	1.4	3.1
GFDLR30	0.9	1.3	2.0
ECHAM4	0.6	1.4	2.2
Modelos	Cambios en precipitación (%)		
	2030	2050	2100
HADCM3	-23.0	-13.1	-66.6
GFDLR30	-6.7	-9.1	7.3
ECHAM4	10	0.28	7

Cuadro 2. Cambios proyectados en temperatura y precipitación para Nicaragua (A2)

Modelos	Cambios en temperatura °C		
	2030	2050	2100
HADCM3	0.9	2.0	4.2
GFDLR30	0.8	1.7	3.8
ECHAM4	0.9	2.0	4.9
Modelos	Cambios en precipitación (%)		
	2030	2050	2100
HADCM3	-16.0	-47.3	-71.9
GFDLR30	31.8	6.2	-9.1
ECHAM4	-1.2	-12.7	-23.6

No obstantes, algunos estudios han determinado que los caudales de los ríos son más sensibles al cambio climático que al cambio en el uso del suelo. Su efecto combinado es más sobre el cambio de la distribución estacional en lugar de una alteración del promedio anual del caudal; los que se fundamenta con base en la comparación de la precipitación y temperatura entre los periodos futuros y el periodo base (Tu 2009). Por lo tanto, se menciona que una reducción del 3% en la precipitación anual puede reducir en 25% de la descarga media del caudal (Mango *et al.* 2011).

Actualmente existen diferentes modelos hidrológicos que pueden contribuir a tomar decisiones, mediante la estimación de las consecuencias de las tendencias y escenarios del clima y cambios de uso del suelo sobre los recursos hídricos (Notter *et al.* 2007). De modo que los pronósticos climáticos a periodos largos, son relevantes para los planificadores y es más seguro para las predicciones climáticas (Candela *et al.* 2009); pero las estimaciones de las

futuras condiciones hidrológicas se pueden mejorar con una mejor comprensión de los efectos combinados de los cambios del clima y el manejo del suelo (Juckem *et al.* 2008).

2.5 Mitigación y adaptación al cambio climático

La degradación de los suelos y de los recursos hídricos genera grandes presiones sobre la seguridad alimentaria. Estas condiciones pueden verse agravadas por el cambio climático. Por lo tanto, los países más pobres se ven más afectados en las últimas décadas (Centroamérica) por los diferentes fenómenos meteorológicos, a diferencia que los países industrializados (CEPAL 2010a). Por lo tanto, el futuro de la seguridad alimentaria hoy en día es muy cuestionado por los impactos del cambio climático sobre la agricultura, de modo que el manejo, la conservación y la planificación de uso del suelo podría ser una de las mejores herramientas para la mitigación y adaptación al cambio climático, porque disminuyen la erosión, mejora la infiltración del agua y nutrientes en el suelo (Guo *et al.* 2008; Juckem *et al.* 2008; Lal *et al.* 2011; Mango *et al.* 2011).

La restauración de los suelos degradados y desérticos son acciones que deben implementarse desde la gestión del agua para garantizar la seguridad alimentaria (Lal *et al.* 2011), de modo que la creciente variabilidad climática pueden agravar la situación futura del recurso hídrico (Candela *et al.* 2009). Por esta razón, el reto de la adaptación al cambio climático exige duplicar esfuerzos para reducir la pobreza, y la vulnerabilidad socioeconómica y ambiental, para aumentar la resiliencia y la capacidad adaptativa de las sociedades. De manera que es más rentable actuar ahora que dejar los problemas a las generaciones futuras (CEPAL 2011).

Además, la protección de los ecosistemas naturales, el uso de zonas amortiguamiento, la conservación de los bosques ribereños y los humedales son también otras herramientas que pueden ayudar a mitigar y adaptarse al cambio climático, porque aseguran una provisión perdurables de los servicios ambientales a los seres humanos(CEPAL 2011; Lal *et al.* 2011). Por lo tanto, se debe promover en los agricultores la construcción de infraestructuras para el almacenamiento de agua en estaciones de lluvia que permita suplir las demandas en estaciones secas (Notter *et al.* 2007).

Por otra parte, la precisión en la variabilidad espacial y temporal de cambios de uso del suelo permite evaluar la eficiencia e impacto de las prácticas de conservación a nivel de campo y/o de cuenca, de manera que es factible identificar las áreas más importantes para la conservación y servicios ambientales (Lal *et al.* 2011).

2.6 Sistemas de información geográfica (SIG) aplicados al recurso hídrico

El manejo del recurso hídrico requiere un amplio rango de datos espaciales, como relieve, clima, suelos, y uso del suelo (Wilson *et al.* 2000), de modo que los sistemas de información geográfica (SIG) y la modelación hidrológica son aplicados para conocer los avances y el manejo de los recursos hídricos, y su contribución es importante para la gestión y la toma de decisiones (Wilson *et al.* 2000; Jayakrishnan *et al.* 2005).

No obstante, los modelos de elevación digital (DEMs) han tenido grandes impactos de aplicaciones de SIG en el estudio del recurso hídrico. Actualmente las nuevas tecnologías como IFSAR (interformetric synthetic apertura radar), LIDAR (light detection and ranging) y GPS (global positioning system) ayudan a obtener una cartografía con mayor detalle y precisión, que permite un mejor análisis y predicción del comportamiento hidrológico y la contaminación en una cuenca hidrográfica (Wilson *et al.* 2000).

Hoy en día, la evolución de la informática ha revolucionado el estudio de los sistemas hidrológicos y la gestión de los recursos hídricos a escalas de cuenca (Jayakrishnan *et al.* 2005), de modo que la evaluación de los recursos hídricos y la gestión son actividades que requieren el manejo múltiples formas de datos espaciales. Los SIG y modelos de simulación han contribuido a la identificación y evaluación de posibles soluciones al agua en las últimas décadas. Las tecnologías de información geográfica han jugado un papel importante en el desarrollo modelos hidrológicos. Estos modelos ofrecen la oportunidad para mejorar nuestra comprensión de los procesos espaciales y los patrones de afectan a la distribución y movimiento del agua en los paisajes así como el impacto del uso del suelo sobre el recurso hídrico a largo plazo (Wilson *et al.* 2000).

2.7 Modelos de cambio de uso del suelo

2.7.1 Cadenas de Markov

Consiste en una modelación estadística del cambio de uso del suelo, que deriva de la combinación y uso de técnicas cartográficas y sistemas de información geográfica (SIG), para identificar la magnitud y distribución espacial y su probabilidad de ocurrencia en el futuro, bajo el supuesto que las técnicas de manejo de suelos siguen siendo similar al pasado (Sandoval y Real 2005).

Este modelo simula la predicción del estado de un sistema en un tiempo determinado a partir de dos estados procedentes, de modo que están formados por algoritmos, que tiene como función comparar dos mapas de ocupación de uso del suelo que se suceden cronológicamente (Paegelow *et al.* 2003), y estiman una matriz de transición áreas y de probabilidades (Paegelow *et al.* 2003; Eastman 2012).

2.7.2 Cellular Automata

Es un procedimiento combinado de celular autómata y la predicción de cambio por la cadenas de markov que suma un elemento de contigüidad espacial así como también el conocimiento sobre la distribución espacial probable de las transiciones (Eastman 2012).

Es un modelo dinámico que son empleados para simular la evolución o la dinámica de una amplia variedad de sistemas naturales y humanos; y está representado por grilla de espacio, en el que un conjunto de reglas de transición determina el atributo de sitio de cada célula teniendo en cuenta los atributos de las células más próximas; además su operatividad, simplicidad y capacidad para representar reglas matemáticas y lógicas, lo hace una herramienta muy exitosa (Ozah *et al.* 2012).

2.8 Modelo hidrológico

2.8.1 SWAT

El SWAT (Soil and Water Assessment Tools) es una herramienta de evaluación de suelo y agua, un modelo que se desarrolló para la gestión de los recursos hídricos y evaluación del suministro del agua y las fuentes de contaminación difisas lo largo de los ríos. Este modelo es utilizado en muchos países de mundo, por su amplia variedad de condiciones ambientales que utilizan (Arnold y Fohrer 2005; White y Chaubey 2005). Además, es una herramienta útil para evaluar los cambios ambientales como el uso del suelo y la variabilidad climática (Li *et al.* 2009). Divide la cuenca en unidades de respuestas hidrológicas (URH), con base a los tipos de suelos, uso del suelo y características de la pendiente a partir de información espacial (DEM, imágenes de satélite y fotografías aéreas). Esta herramienta a partir de estas URH y datos climáticos (temperatura y precipitación diaria) estiman componentes hidrológicos tales como la evapotranspiración, escorrentía superficial, velocidad de escurrimiento, flujo de agua subterránea y la producción de sedimentos para cada URH o cuenca (Arnold y Fohrer 2005; Olivera *et al.* 2006; George y Leon 2007; Setegn *et al.* 2008; Betrie *et al.* 2011).

El SWAT se integra como ArcGis-SWAT es un software de SIG, una herramienta que trabaja como un sistema de base datos georeferenciados que tiene valores numéricos y de texto que se ingresan de manera organizada (Olivera *et al.* 2006; Setegn *et al.* 2008); el interfaz con los SIG le permite visualizar los mapas y gráficos de salida (Arnold y Fohrer 2005).

El SWAT es definido por 8 mayores componentes: hidrología, clima, erosión y sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de plantas, nutriente, pesticidas y manejo del suelo (Miller *et al.* 2007). El presente estudio se va enfocar solo a los componentes de hidrología y el clima.

El modelo SWAT ofrece tres métodos para calcular la evapotranspiración: Penman-Monteith, Priestley-Taylor o Hargreaves. La primera es considerada la mejor y el más recomendable, pero requiere de mayores datos como radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento; y la segunda requiere de radiación solar, temperatura del aire, y humedad relativa; y el tercero solamente requiere de temperatura del aire. Los dos últimos métodos tienen la ventaja de necesitar de menos información y se utiliza cuando se presenta datos faltantes (Heuvelmans *et al.* 2005; Kalin y Hantush 2006).

La calibración y validación del modelo es un factor clave para reducir la incertidumbre y el aumento en la capacidad de predicción, convirtiéndole en un modelo más eficaz para análisis de información (White y Chaubey 2005). Por lo tanto, la calibración hidrológica es el primer paso en la comprensión del complejo proceso hidrogeológica de la cuenca, su análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo ayuda a comprender el comportamiento de la respuesta de la cuenca y sus interacciones (Jha 2011).

2.9 Bibliografía

Aaviksoo, K. 1993. Changes of plant cover and land use types (1950's to 1980's) in three mire reserves and their neighbourhood in Estonia. Landscape Ecology 8(4):287-301.

Arnold, J; Fohrer, N. 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. Hydrological Processes 19(3):563-572.

Arnold, JG; Allen, PM; Bernhardt, G. 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. Journal of Hydrology 142(1-4):47-69.

Betrie, GD; Mohamed, YA; Griensven, Av; Srinivasan, R. 2011. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. Hydrology and Earth System Sciences 15(3):807-818.

Brown, DG; Pijanowski, B; Duh, J. 2000. Modeling the relationships between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest, USA. Journal of Environmental Management 59(4):247-263.

Candela, L; Igel, Wv; Javier Elorza, F; Aronica, G. 2009. Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland (Majorca, Spain). Journal of Hydrology (Amsterdam) 376(3/4):510-527.

CEPAL, (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2010a. Nicaragua efectos del cambio climático sobre la agricultura. p. 72 p.

_____. 2010b. La economía del cambio climático en centroamérica: Síntesis 2010. p. 143 p.

_____. 2011. La economía del cambio climático en centroamérica: Reporte técnico 2011. 419 p.

Eastman, JR. 2012. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Clark University 17:321 p.

George, C; Leon, L. 2007. WaterBase: SWAT in an open source GIS. The Open Hydrology Journal 1:19-24.

Guo, H; Hu, Q; Jiang, T. 2008. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. Journal of Hydrology (Amsterdam) 355(1/4):106-122.

Heuvelmans, G; Garcia-Qujano, JF; Muys, B; Feyen, J; Coppin, P. 2005. Modelling the water balance with SWAT as part of the land use impact evaluation in a life cycle study of CO2 emission reduction scenarios. Hydrological Processes 19(3):729-748.

INAB, (Instituto Nacional de Bosques). 2003. Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural. Manual Técnico. Guatemala. p. 106 p.

IPCC, (Intergovernanmental Panel on Climate Change). 2000. Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (US).

_____. 2002. Cambio climático y biodiversidad. 85p.

Jayakrishnan, R; Srinivasan, R; Santhi, C; Arnold, J. 2005. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. Hydrological Processes 19(3):749-762.

Jha, MK. 2011. Evaluating hydrologic response of an agricultural watershed for watershed analysis. Water 3(2):604-617.

Juckem, PF; Hunt, RJ; Anderson, MP; Robertson, DM. 2008. Effects of climate and land management change on streamflow in the driftless area of Wisconsin. Journal of Hydrology (Amsterdam) 355(1/4):123-130.

Kalin, L; Hantush, MM. 2006. Hydrologic modeling of an eastern Pennsylvania watershed with NEXRAD and rain gauge data. Journal of Hydrologic Engineering 11:555.

Kamusoko, C; Oono, K; Nakazawa, A; Wada, Y; Nakada, R; Hosokawa, T; Tomimura, S; Furuya, T; Iwata, A; Moriike, H. 2011. Spatial Simulation Modelling of Future Forest Cover Change Scenarios in Luangprabang Province, Lao PDR. Forests 2(3):707-729.

Lal, R; Delgado, J; Groffman, P; Millar, N; Dell, C; Rotz, A. 2011. Management to mitigate and adapt to climate change. Journal of Soil and Water Conservation 66(4):276-285.

Li, Z; Liu, W; Zhang, X; Zheng, F. 2009. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology (Amsterdam) 377(1/2):35-42.

MAGFOR, (Ministerio Agropecuario Forestal). 2005. Valoración forestal Nicaragua 2000. Managua p. 178 p. (Tomo I)

Mango, L; Melesse, A; McClain, M; Gann, D; Setegn, S. 2011. Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: results of a modeling study to support better resource management. Hydrol. Earth Syst. Sci 15:2245-2258.

Miller, SN; Semmens, DJ; Goodrich, DC; Hernandez, M; Miller, RC; Kepner, WG; Guertin, DP. 2007. The automated geospatial watershed assessment tool. Environmental Modelling & Software 22(3):365-377.

Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J; Williams, J. 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2005. Texas Water Resources Institute, College Station, Tex:494 p.

Notter, B; MacMillan, L; Viviroli, D; Weingartner, R; Liniger, HP. 2007. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region. Journal of Hydrology (Amsterdam) 343(3/4):266-278.

ODESAR, (Organización para Desarrollo Económico y Social para el Área Urbana y Rural). 2008. Análisis de la problemática ambiental municipal de Muy Muy. Nicaragua p. 28 p.

Olivera, F; Valenzuela, M; Srinivasan, R; Choi, J; Cho, H; Koka, S; Agrawal, A. 2006. ARCGIS-SWAT: a geodata model and GIS interface for SWAT. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 42(2):295-309.

Ozah, AP; Dami, A; Adesina, FA. 2012. A Deterministic Cellular Automata Model for Simulating Rural Land Use Dynamics: A Case Study of Lake Chad Basin. Journal of Earth Science and Engineering 2(1):22-34.

Paegelow, M; Camacho, M; Menor, J. 2003. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. Geofocus 3:22-44.

Ruiz Benito, P; Cuevas, JA; Bravo de la Parra, R; Garcia del Barrio, JM; Zavala, MA. 2010. Land use change in a Mediterranean metropolitan region and its periphery: assessment of conservation policies through CORINE Land Cover data and Markov models. Forest Systems 19(3):315-328.

Sandoval, V; Real, P. 2005. Modelamiento y prognosis estadística y cartográfica del cambio en el uso de la tierra. Bosque 26(1):55-63.

Setegn, SG; Srinivasan, R; Dargahi, B. 2008. Hydrological modelling in the Lake Tana Basin, ethiopia using SWAT model. Open Hydrology Journal 2:49-62.

Soares-Filho, B; Alencar, A; Nepstad, D; Cerqueira, G; Diaz, V; del Carmen, M; Rivero, S; Solórzano, L; Voll, E. 2004. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém–Cuiabá corridor. Global Change Biology 10(5):745-764.

Solis, H; Oreamundo, R; Murrillo, W; Chacon, J. 1993. Modelación hidrológica e hidráulica para el control de inundaciones en centroamérica. CATIE, Costa Rica.

Teixeira, AMG; Soares-Filho, BS; Freitas, SR; Metzger, JP. 2009. Modeling landscape dynamics in an Atlantic Rainforest region: implications for conservation. Forest Ecology and Management 257(4):1219-1230.

Tu, J. 2009. Combined impact of climate and land use changes on streamflow and water quality in eastern Massachusetts, USA. Journal of Hydrology (Amsterdam) 379(3/4):268-283.

Turner, BL; Meyer, WB. 1991. Land use and land cover in global environmental change: Considerations for study. International Social Science Journal 43(4):669-79.

Weng, Q. 2002. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. Journal of Environmental Management 64(3):273-284.

White, KL; Chaubey, I. 2005. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 41(5):1077-1089.

Wilson, JP; Mitasova, H; Wright, DJ. 2000. Water resource applications of geographic information systems. Urisa Journal 12(2):61-79.

3 ARTICULO I. ANÁLISIS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO (1980-2010) Y SU PREDICCIÓN FUTURA MEDIANTE MODELOS ESTOCÁSTICOS, EN LA CUENCA DEL RÍO COMPASAGUA, NICARAGUA

3.1 Resumen

Los cambios de uso del suelo en la cuenca del río Compasagua, Muy Muy, Nicaragua han experimentado cambios muy importantes en los últimos 30 años. Por esta razón, se ha realizado un análisis espacial para evaluar los principales cambios y los factores que lo originan y su tendencia para el 2030. Para esto, se ha elaborado los mapas de uso suelo para el año de 1980 a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas del año de 1980; además se utilizó los mapas de uso del 2010 realizado por la Asociación de Municipios Productivos del Norte (AMUNPNOR), obtenidas a partir de imágenes de satélite SPOT-5 (2.5 m); posteriormente está información fue integrada a los modelos de cadena de markov y cellular Automata para la generación de la matriz de transición de áreas y probabilidades, y sus proyecciones futuras.

La dinámica espacial de los diferentes usos de suelos, muestran que los bosques densos han presentado una reducción aproximadamente en 31% de su superficie comparados entre 1980 y 2010. Por otra parte, la mayor intensidad de transición se ha presentado más en las categorías con pastos sin árboles, bosques densos y bosques secundarios recientes. Este último se ha producido principalmente por el abandono de las pasturas; en consecuencia, la apertura de nuevas áreas. Por lo tanto, las principales causas que han influido en los cambios de uso del suelo fueron más por la ganadería extensiva, transformando extensas áreas de bosques a monocultivos de pastos. Posteriormente, estos sistemas de manejo de pasturas cambiaron de forma positiva con la asociación de pastos con árboles dispersos por regeneración natural durante los últimos 30 años, los que represento un incremento en más de 700% de su superficie, y para los próximos 20 años solo se espera un incremento en 21%.

Palabras clave: Fotointerpretación, uso del suelo, markov, cellular automata, transición

3.2 Introducción

En Nicaragua el sector agropecuario desempeña un papel importante dentro de la actividad económica y la producción de alimentos (CEPAL 2010). No obstante, este crecimiento ha tenido una relación muy directa en la reducción de los bosques, a medida que se han ampliado más áreas de pasturas para la ganadería extensiva (Brown *et al.* 2000). La cuenca del río compasagua, representa el 46% de la superficie del municipio de Muy Muy, y concentra la actividad ganadera más importante de la zona. Por lo tanto, en los últimos periodos han experimentado cambios en los diferentes uso del suelo, por el incremento de la

ganadería, a causa de la demanda de carne y leche de empresas nacionales; por otro lado, la extracción de las especies forestales maderables, la agricultura migratoria fueron otros agentes trascendentales que incidieron en la reducción de los bosques (MAGFOR 2005; ODESAR 2008).

Analizar los diferentes cambios de uso del suelo es importante para comprender los vínculos entre los procesos socioeconómicos y el manejo de los recursos naturales (Turner y Meyer 1991); además existen nuevas tecnologías como las imágenes de satélite que son usados para determinar y cuantificar los usos de suelos en diferentes periodos a través de observaciones de las características biofísicas de los suelos (Brown *et al.* 2000). De la misma manera, las nuevas herramientas tecnológicas como los modelos estocásticos (markov y cellular autómata) son utilizados para evaluar la dinámica espacial de los cambios de uso de suelo, y hacer proyecciones futuras a partir de la transición de áreas y probabilidades, en el entorno de sistemas de información geográfica (Aaviksoo 1993; Brown *et al.* 2000; Weng 2002; Fan *et al.* 2008; Ruiz Benito *et al.* 2010; Kamusoko *et al.* 2011); además, estos modelos presenta resultados fiables para simular los cambios de uso futuro en el suelo(Aaviksoo 1993; Soares-Filho *et al.* 2004; Teixeira *et al.* 2009), por lo que proporcionan información visual y cuantitativa (Soares-Filho *et al.* 2004) que pueden utilizarse para la gestión del territorio (Ruiz Benito *et al.* 2010).

Mediante la modelación en un sistema de información geográfica (SIG), es posible conocer la dinámica de cambios de uso del suelo en diferentes periodos, de modo que es fundamental en la toma de decisiones para la planificación de un territorio. Por lo que nos permite examinar donde y en qué se presentan las modificaciones del paisaje; y además, entender cómo y por qué ocurren los cambios (Weng 2002; Yang y Lo 2002); inclusive, permite identificar las áreas más susceptibles a cambiar (Veldkamp y Lambin 2001). La importancia de esta investigación, radica en que no se conocen con exactitud estas transiciones de usos y los factores que lo originan, de modo que esta información va servir como instrumento para una mejor la gestión del territorio.

El objetivo del estudio consiste en identificar y evaluar las principales causas que influyen en la dinámica espacial en los cambios de uso de suelo a escala local entre los años de 1980 y 2010, preponderantemente los que inciden en la reducción de los bosques, de manera que se pueda evaluar las principales transiciones; asimismo, sus potencialidades y limitaciones, y posteriormente un análisis de las proyecciones futuras para el 2030 de los principales cambios, mediante los modelos de cadenas de markov y cellular automata.

3.3 Materiales y métodos

3.3.1 Área de estudio

La cuenca del río Compasagua tiene un área de 170 km^2 y está ubicada en el municipio de Muy Muy, en la parte sur del departamento de Matagalpa, a una distancia aproximada de 56 km y de 148 km de la capital de Managua (AMUPNOR 2010); con coordenadas geográficas de 12° 40’ y 12° 60’ N y 85° 30’ y 85° 45’ O, presenta con un rango altitudinal de 270 y 650 m.s.n.m. La población actual a nivel de municipio es de 14721 habitantes, donde 10684 (73%) está representada por población rural y el 4037 por la población urbana (17%) (AMUPNOR 2010). Presenta un clima de bosque subhúmedo tropical, con una precipitación que no superan los 2000 mm anuales. El periodo húmedo es entre los meses de mayo a noviembre y el periodo seco es de diciembre a abril con temperaturas medias anuales que oscila entre 23 a 28°C. Se caracteriza por presentar bosques perennifolios de zonas secas y húmedas; con respecto a la topografía es muy variada con predominio de suelos ondulados de 20399 ha (55%), y suelos planos de 16265 ha (43%) y zonas abruptas de 874 ha (2%) y la principal actividad económica es la ganadería (AMUPNOR 2010).

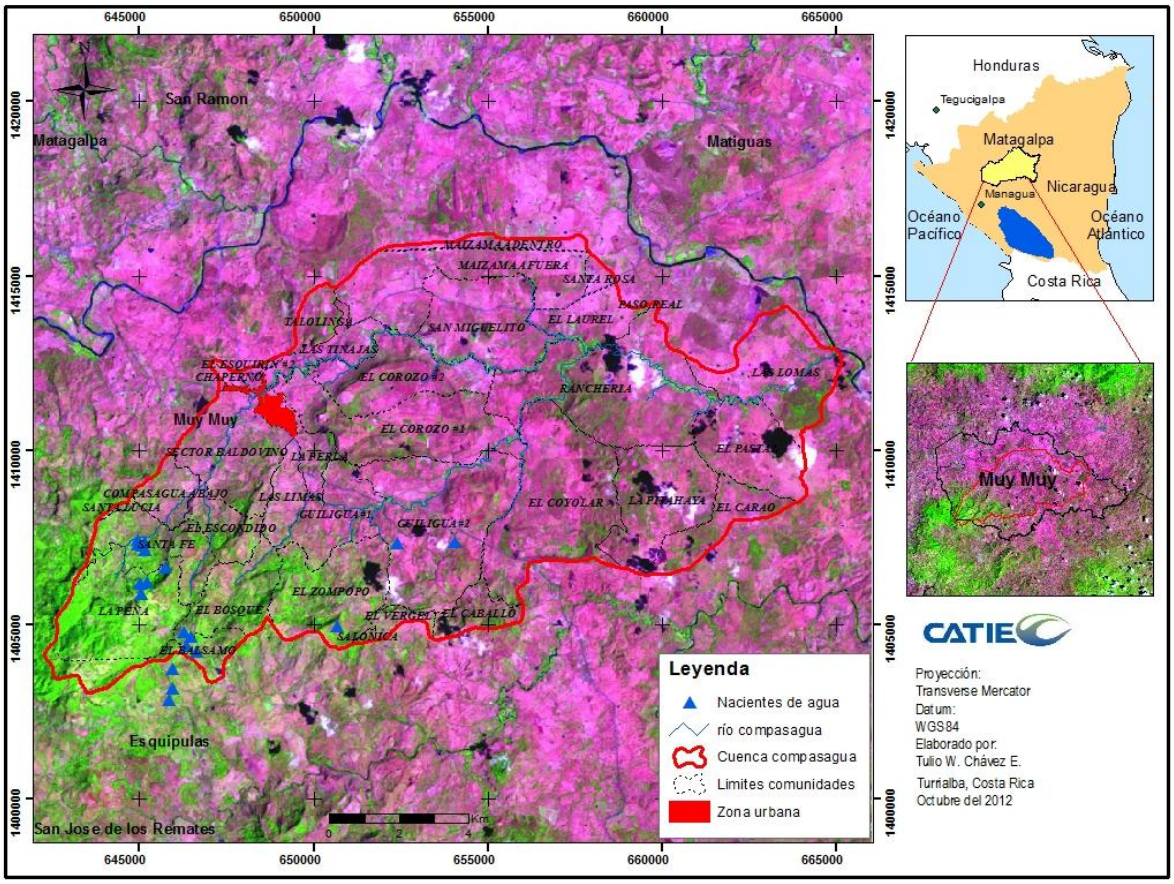

Figura 1. Ubicación del área de estudio

3.4 Procedimiento metodológico

3.4.1 Corrección geométrica de imágenes de satélite y ortorectifación de fotografías aéreas

Se realizó la corrección geométrica de una imagen de satélite SPOT 5 del 2010 con 2.5 m de resolución espacial con referencia a la cartografía oficial a escala 1:50 000 del Instituto nicaragüense de estudios territoriales (INETER); del mismo modo se realizó la ortorectificación (Lillesand *et al.* 2004; Morgan *et al.* 2010) de 12 fotografías aéreas del 1980 a escala 1:40 000, que cubren la zona en estudio con errores de medios cuadráticos (RMS) de 2.7 m para 20 puntos de control, por lo cual se han utilizado la siguiente información: (1) modelos de elevación digital (DEM) a 10 m de resolución espacial, que se generó a partir de la interpolación de la curvas de nivel a escala 1:50 000; (2) puntos de control que fueron tomados a partir de los mapas cartográficos (Morgado y Dowman 1997). Posteriormente para los proceso de corrección de las fotografías aéreas, se ha realizado lo siguiente: Primero, se ha corregido la distorsión radial, que consiste en la corrección de los errores de cámara (Kersten y Haering 1997; Dewitt y Wolf 2000); Segundo, se realizó la corrección del desplazamiento mediante puntos de control (Liang y Heipke 1996), los que se producen a causa del movimiento del avión en momento de la toma (Paine y Kiser 2003); por último, es la corrección de la distorsión del terreno mediante los modelos de elevación digital (DEM), que corrige los efectos de la variaciones de alturas producidos por la topografía ondulada o agreste del terreno (Paine y Kiser 2003; Aronoff 2005). Por lo que es importante hacer estas correcciones para evitar errores en el momento de interpretación (Morgan *et al.* 2010).

Una vez corregido todas las fotografías aéreas se realizó un mosaico para la fotointerpretación de los usos de suelo.

3.4.2 Elaboración de mapas de uso del suelo

El utilizó la información del mapa de uso del suelo del 2010, realizados por la Asociación de municipios productivos del norte (AMUPNOR) de Muy Muy. Esta información fue validada mediante una imagen de satélite SPOT 5 del 2010 con 2.5 m de resolución espacial, y con visitas in situ; posteriormente la cartografía fue ajustada en base a criterios de clasificación por FAO (2000) y Gallego (2002) que se muestran en el cuadro 3. El mapa de uso del suelo de 1980, se elaboró a partir de la fotointerpretación de 12 fotografías aéreas pancromáticas, teniéndose en cuenta la digitalización de la textura y color de la fotografía y el mapa de uso del 2010, y como unidad mínima de mapeo se estableció 0.5 ha. La información fue validada in situ y con entrevistas a los productores con respecto al uso de años anteriores. Además se utilizó imágenes de satélite Landsat TM de año 1986, con combinaciones de bandas infrarrojas R:5, B:4, G: 3; para corroborar y verificar los cambios de uso.

3.4.3 Elaboración de la matriz de transición y Modelación de escenarios

A partir de los mapas de uso de suelo de 1980 y 2010, se obtuvieron la matriz de transición para las diferentes categorías de uso. Mediante los modelos de cadenas de markov, se ha generado la matriz de transición de áreas y probabilidades (Aaviksoo 1993; Brown *et al.* 2000; Benito *et al.* 2010; Eastman 2012). Los modelos de cadena de markov tienen la capacidad de ser descriptivo y proyectar las tendencias de cambio de uso, asumiendo que la persistencia continúan igual en el futuro (Briassoulis 2000; Weng 2002; Fan *et al.* 2008).

Para las predicciones futuras de uso de suelo del 2030, se trabajó mediante la combinación de los modelos de cadenas de markov y cellular autómata (CA) (Aaviksoo 1993; Brown *et al.* 2000; Weng 2002; Fan *et al.* 2008; Ruiz Benito *et al.* 2010; Kamusoko *et al.* 2011), mediante la utilización de la matriz de transición de áreas y de probabilidades (Fan *et al.* 2008; Eastman 2012), y pueden aplicarse fácilmente para predecir los cambios futuros del sistema (Aaviksoo 1993), determinar la dirección y la magnitud del cambio, así como la descripción cuantitativa (Weng 2002; Tang *et al.* 2007; Ruiz Benito *et al.* 2010), de modo que son útil para el análisis de los cambios y la gestión del territorio (Ruiz Benito *et al.* 2010).

En cuanto a la precisión de los modelos, se menciona que tiene una buena aproximación con respecto a los cambios naturales con errores relativos 1 a 10%, y con respecto a los de origen antrópico son menos predecibles hasta el 30%, dentro de estos errores pueden estar incluidos los de digitalización e interpretación (Aaviksoo 1993). Sin embargo, con la incorporación de más algoritmos espaciales es posible tener una mejor predicción de los cambios de uso en el futuro (Tang *et al.* 2007). Por la tanto, las características más importantes de la cellular autómata es que puede ser utilizado para simular patrones dinámicos espaciales complejos a través de un conjunto reglas sencillas de transición (Fan *et al.* 2008).

Para la modelación de escenarios futuros de uso de suelo, se asumió que la probabilidad de transición es uniforme o constante para los factores biofísicos (Kamusoko *et al.* 2011), debido que es difícil acomodar la influencia impredecible de variables como el clima, política o perturbación humana, porque el cambio en el paisaje no suele ser constante en un periodo (Tang *et al.* 2007). Para la clasificación de los diferentes de uso de suelo, se ha categorizado en 8 clases (cuadro 3), que agrupa la mayor parte de uso con característica similares por ejemplo los cultivos de maíz, frijoles se agrupo en cultivos anuales; los bosques riparios agrupados en los bosques densos. De modo que es los más recomendable cuando se pretende hacer simulaciones futuras de cambios de uso del suelo, para evitar confusiones y las transiciones de uso sean coherentes. Por lo tanto, Aaviksoo (1993), menciona que un esquema de clasificación de general de uso de suelo para la predicción futura con los modelos de markov, debe consistir en tres clases (natural, seminatural y antrópico) debido una que se ha tenido una mayor fiabilidad en la aplicación del modelo ante una comparación con varios tipos de clases de usos.

Cuadro 3. Categorías de uso identificados en la zona de estudio con base a criterios de FAO(2000) y Gallego(2002)

ID	Sigla	Categoría de uso/cobertura	Descripción
1	bden	Bosque denso	La vegetación cubre el área de manera regular, densa y con textura rugosa. La cobertura de copas tiene 70% o más.
2	bd_int	Bosque denso intervenido	Áreas donde el tipo de vegetación estructural cubre más del 50% y la cobertura del dosel se encuentran ente el 40 y 70% abierta. El bosque se caracterizan por haber sido disturbado (extracción selectiva de árboles para madera y leña).
3	bsecun	Bosque secundario reciente	Vegetación boscosa (árboles y arbustos) que presentan una cobertura del 70% o menos, con apariencia de textura plana y color más oscuro (generalmente) que las áreas de pastos. Presenta algunas áreas sin bosque en su interior.
4	Cafsomb*	Café con sombra	Áreas mayores a 5 hectáreas, asociadas con especies forestales como sombra, con una cobertura de copa no mayor de 50%.
5	pastarb/pad*	Pastos con árboles dispersos	Áreas con una densidad de cobertura arbórea entre el 5 y 40%. El estrato horizontal de vegetación corresponde a herbáceas-gramíneas.
6	pastos/psa*	Pastos/pastos sin árboles*	Áreas con más del 75% de gramíneas como cobertura herbácea y con un densidad de con una densidad de cobertura arbórea menor del 5%.
7	agrmix/ca*	Agricultura mixta/cultivos anuales*	Áreas con tamaño medio (2-5 hectáreas), de cultivos múltiples anuales y perennes (dos o más cultivos que crecen simultáneamente en el mismo lugar).
8	zurb*	Zona urbana	Áreas poblados con densidad media a baja.

* Categorías de calificación asignadas a criterio personal

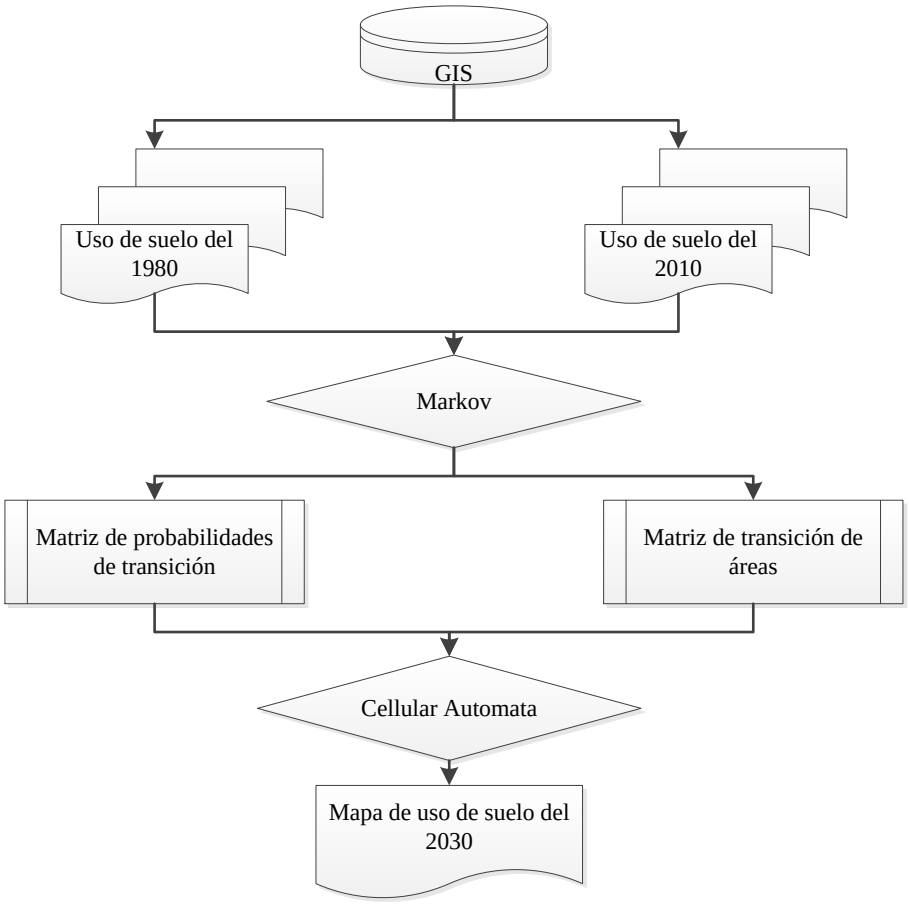

Figura 2. Diagrama del proceso metodológico de la dinámica espacial

3.5 Resultados

3.5.1 Evaluación de los cambios de uso del suelo

En el cuadro 4, se muestra los resultados de los cambios de uso del suelo para los diferentes periodos analizados, determinándose para el año de 1980 una mayor dominancia, por pastos sin árboles (57.90%), seguida por los bosques densos con alta concentración en topografías onduladas (18.53%) y finalmente los bosques secundarios recientes (10.47%) y por debajo de estos porcentajes los otros usos. Para el año 2010, se presenta una dominancia de uso de suelo con pastos con árboles dispersos (36.89%), seguida de pastos sin árboles (21.84%), luego por los bosques secundarios recientes (16.23%) y por último los bosques densos (12.83%), los otros usos solo representan por debajo del 10%.

Por lo tanto, las áreas que mostraron mayores cambios con respecto a su extensión para 1980, fueron las pasturas con árboles dispersos con un incremento en más 700% (5546 ha), representando una tasa de cambio en 6.93% promedio anual, al mismo tiempo ha significado la reducción de los pastos sin árboles en más 62% (6195.8 Ha), con una tasa de reducción

anual en -3.25%; asimismo, los cultivos anuales se incrementaron en más 177.8 ha (32%), con una tasa de cambio de 3.41%, al mismo tiempo la zona urbana se triplico su extensión por el crecimiento poblacional en 127.7% (48.4 Ha) con tasa de cambio en 2.74%. Mientras tanto, los bosques secundarios recientes se incrementaron en 54.9% (988.4 Ha); y los bosques densos intervenido en 38.1% (454.1Ha); mientras tanto, los bosques densos se reducen en 30.8% (979.9 Ha). En cambio, los bosques secundarios recientes situados mayormente en topografías planas (cuenca baja) y los cultivos de café en zonas onduladas (cuenca alta) se incrementó por encima del 50% con una tasa promedio cambio entre 1.08 y 1.46 respectivamente.

Cuadro 4. Cambios de uso del suelo para los diferentes periodos 1980-10

Uso de suelo	1980		2010		Cambio		Tasa de cambio
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	(%)
Bosques densos	3184.5	18.53	2204.6	12.83	-979.9	-30.8	-1.23
Bosques densos intervenido	1190.9	6.93	1645	9.57	454.1	38.1	1.08
Bosques secundarios recientes	1799.6	10.47	2788	16.23	988.4	54.9	1.46
Café con sombra	212.1	1.23	318.1	1.85	106.0	50.0	1.35
Pastos con árboles	791.8	4.61	6338.7	36.89	5546.9	700.5	6.93
Pasto sin árboles	9948.4	57.90	3752.6	21.84	-6195.8	-62.3	-3.25
Cultivo anual	18	0.10	50	0.29	32.0	177.8	3.41
Zona urbana	37.9	0.22	86.3	0.50	48.4	127.7	2.74

3.5.2 Matriz de transición de uso del suelo

En el cuadro 5, se muestra la matriz de transición de áreas para los usos del suelo entre 1980 y 2010, donde las filas y columnas representan las pérdidas y ganancias que se han producido por cambio de uso del suelo, así también las áreas que han permanecidos intactas hasta el 2010 (color verde).

Cuadro 5. Matriz de transición de cambio de uso de suelo entre 1980-10 (hectáreas)

Uso del suelo	bdenso	b_int	bsecun	Cafsomb	pad	psa	ca	zurb	Total 1980
bdenso	1490.2	391.3	384.5	1.0	403.7	490.9	21.5	1.4	3184.5
bd_int	64.7	558.5	157.1	0.1	322.7	87.7	0.0	0.0	1190.9
bsecun	58.2	95.0	568.1	45.0	797.1	233.3	2.8	0.1	1799.6
Cafsomb	0.0	0.0	0.0	212.1	0.0	0.0	0.0	0.0	212.1
pad	42.0	103.9	66.0	2.6	555.7	21.5	0.0	0.0	791.8
psa	547.5	493.3	1612.2	57.2	4253.2	2919.1	17.3	48.6	9948.4
ca	0.4	3.0	0.0	0.0	6.2	0.0	8.4	0.0	18.0
zurb	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	36.2	37.9
Total 2010	2204.6	1645.0	2788.0	318.1	6338.7	3752.6	50.0	86.3	17183.2

Bosques densos sin intervención (bdenso), bosques densos intervenido (bd_int), bosques secundarios recientes (bsecun), café con sombra (cafsomb), pastos con árboles dispersos (pad), pastos sin árboles (psa), cultivos anuales (ca) y zona urbana (zurb).

Para los últimos 30 años, los bosques densos han presentado una alta dinámica, manteniéndose intactos en un 53% (1490.2 ha), mientras que el 43% se transformaron a otros tipos de usos, principalmente en ganadería. Por otra parte, la mayor transición de uso del suelo en los últimos periodos, fue de pastos sin árboles (psa) para pastos con árboles dispersos (pad) en 4253.2 ha; seguida, por los bosques secundarios recientes (bsecun) en 1612.2 ha; luego, en bosques densos 547.5 ha; posteriormente, en bosques densos intervenido en 493.3 ha. Mostrándose una restructuración natural para la mayoría de los bosques sobre todo en las márgenes de ríos (figura 5).

La disminución de los bosques densos (bdenso) se muestra directamente relacionado con la extensión de la ganadería, que representó una disminución en 490.9 ha para ser transformado a pastos sin árboles (psa) y 403.7 ha en pastos con árboles dispersos (pad); por otra parte, los bosques densos se convierten en bosques denso intervenido (b_int) en 391.3 ha y bosques secundarios recientes (bsecun) en 384.5 ha (figura 5).

Mientras tanto, los bosques secundarios también pierden superficies en otros sectores de la cuenca entre 233.3 a 797.1 ha para ser convertido en pastos sin árboles (psa) y con árboles (pad) respectivamente (cuadro 5)

3.5.3 Pérdidas y ganancias de uso del suelo para 1980-10

En la figura 3, se muestra los resultados en porcentaje de las pérdidas y ganancias del uso del suelo de 1980 y el 2010. Mientras tanto, en la figura 4, se presentan la distribución espacial de los bosques que experimentaron pérdidas y ganancias para los últimos 30 años.

Los usos de suelos que mostraron mayores pérdidas a nivel de toda la cuenca fueron los pastos sin árboles (psa) con una reducción de 23.25%; seguida, por bosques densos en 5.6%. Mientras tanto, los pastos con árboles dispersos fueron los que mostraron las mayores ganancias de superficies con 19.13%; luego, los bosques secundarios recientes con crecimiento en 7.34%. En la figura 5, se muestran los principales cambios de uso de suelos, que se han presentado en toda la cuenca con la comparación de fotografías aéreas de 1980 y con imágenes de satélite SPOT 5 del 2010.

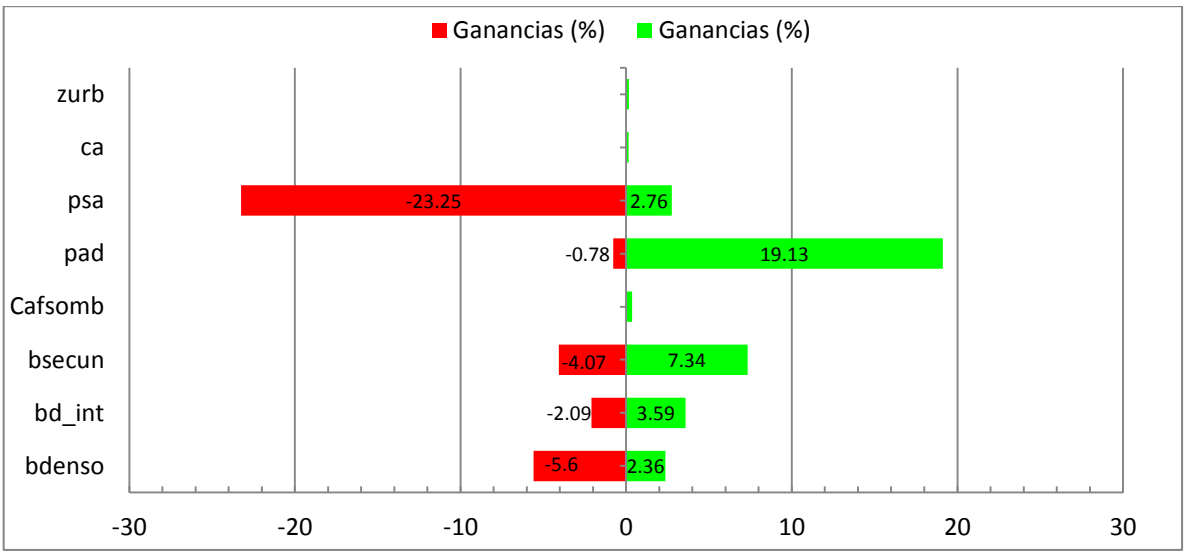

Figura 3. Análisis de las pérdidas y ganancias de usos del suelo para 1980-10

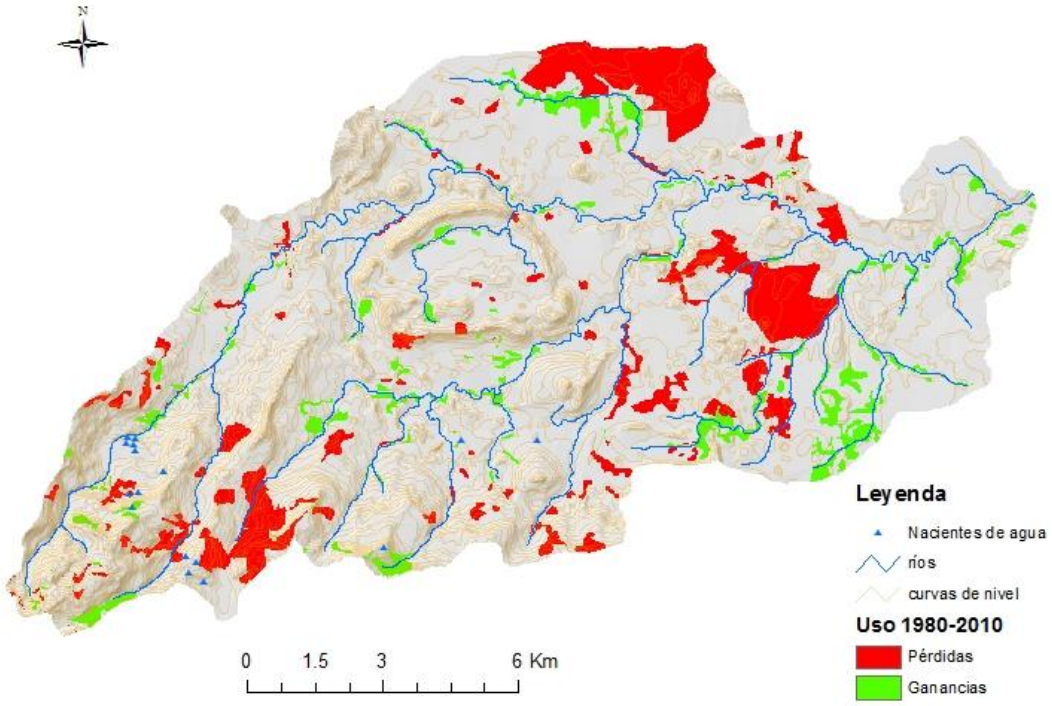

Figura 4. Mapas de pérdidas y ganancias de usos del suelo para 1980-10

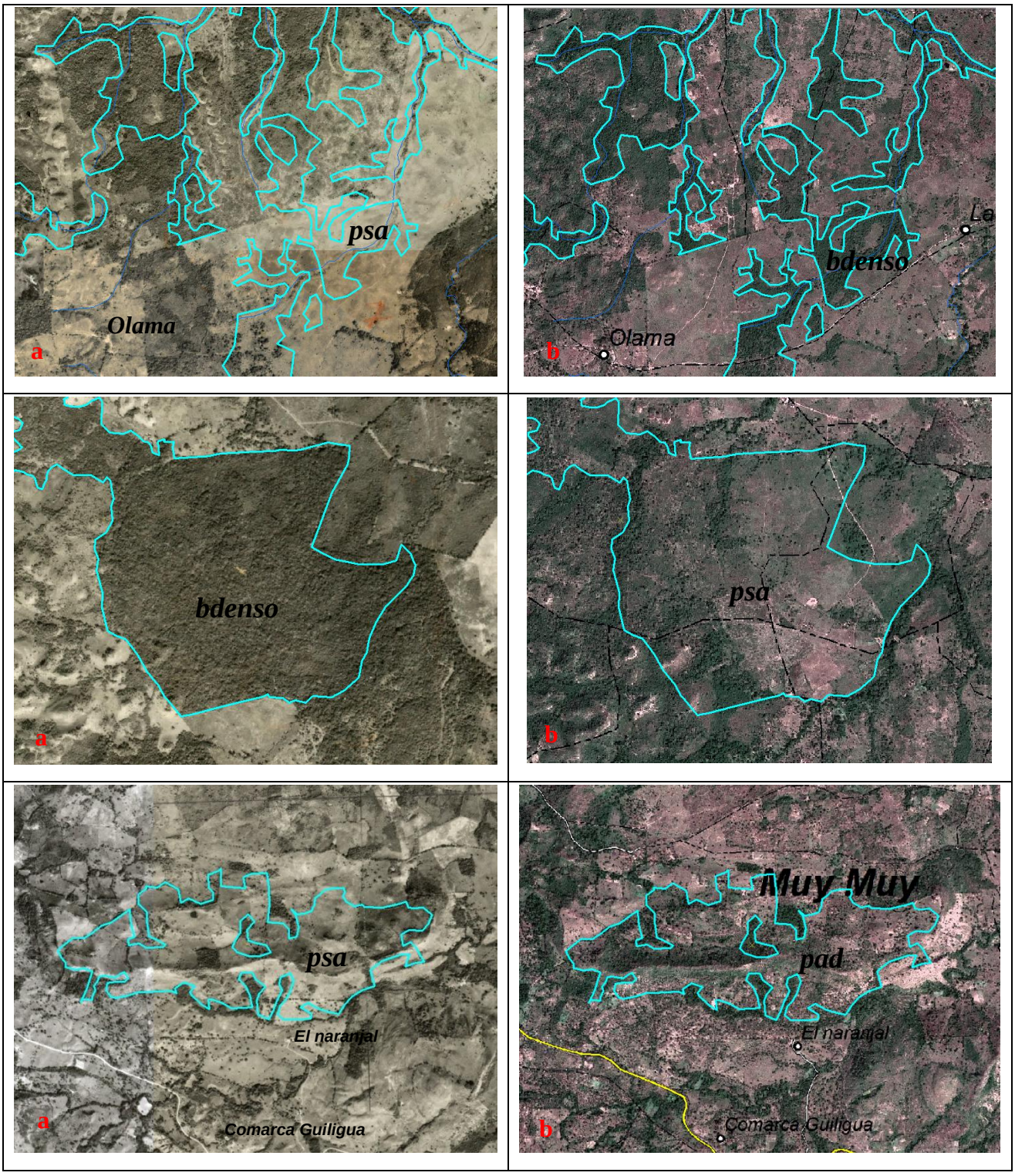

Figura 5. Principales transiciones de superficies de uso de suelo entre 1980 (a) y 2010(b)

3.5.4 Modelación para escenarios de uso del suelo para el 2030

En el cuadro 6, se muestran las proyecciones de uso del suelo para el año 2030, muestran mayor extensión de pastos con árboles (44.68%) y seguida de bosques secundarios recientes (15.76%).

Mediante comparaciones entre los mapas de uso de suelo del año 2010 y 2030 (cuadro 6), manifiestan que los pastos sin árboles se reducirán en 1403.9 ha (37.4%); Así mismo, los pastos con árboles dispersos presentan un incremento en 1338.8 ha (21.1%). En cambio, los bosques densos intervenidos ostentan un crecimiento de 504.4 ha (30.7%), y los bosques densos van a experimentar una reducción en 359 ha (16.3%). Mientras tanto, las tasas de cambio anual van a variar entre -2.34% correspondientes a los niveles más altos de reducción para los usos con pastos sin árboles, y los más bajos para los cultivos de café con sombra en 0.05%.

Cuadro 6. Cambios de uso del suelo para los diferentes periodos 2010-30

Uso de suelo	2010		2030		Cambio		Tasa de cambio
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	(%)
Bosques densos	2204.6	12.83	1844.7	10.74	-359.9	-16.3	-0.89
Bosques densos intervenido	1645	9.57	2149.4	12.51	504.4	30.7	1.34
Bosques secundarios recientes	2788	16.23	2708.8	15.76	-79.2	-2.8	-0.14
Café con sombra	318.1	1.85	321.4	1.87	3.3	1.0	0.05
Pastos con árboles dispersos	6338.7	36.89	7677.5	44.68	1338.8	21.1	0.96
Pasto sin árboles	3752.6	21.84	2348.7	13.67	-1403.9	-37.4	-2.34
Cultivo anual	50	0.29	42.2	0.25	-7.8	-15.6	-0.85
Zona urbana	86.3	0.50	90.3	0.53	4.0	4.6	0.23

3.5.5 Análisis de probabilidades de transición para el 2030

El cuadro 7, se muestra las probabilidades de transición para el año 2030, con base a la información de los mapas de uso de suelo de 1980 y 2010. Por lo tanto, se muestra en diagonal las matrices de probabilidades que indican la persistencia en cuanto a los diferentes uso del suelo (color amarrillo); de modo que para el cultivo de café la persistencia se presenta en un 1 (100%), en cuanto a la zona urbana es de 0.9 (90%), seguida por los pastos con árboles dispersos en 0.7 (70%), y posteriormente por los cultivos anuales de 0.6 (60%) y por último los bosques densos, bosque intervenidos, bosques secundarios recientes y pastos sin árboles son los que tienen una baja probabilidad de persistencia en el tiempo de 0.4 (40%) a 0.5 (50%). Mientras tanto, los otros valores indican las probabilidades de ganar (columna) y perder (fila) superficies en los diferentes usos de suelo; de tal modo, que los cultivos de pastos con árboles presentan las mayores probabilidades de transición para ganar superficies, a partir

de los pastos sin árboles y bosques secundarios recientes en 0.4 (40%) para ambos usos; mientras tanto, los pastos sin árboles también presentan una probabilidad de crecimiento que implica la disminución de los bosques densos en 0.2 (20%), y los otros bosques (b_interve, bsecun) en 0.1 (10%).

Cuadro 7. Probabilidades de transición esperada de uso del suelo para el 2030

Uso del suelo	bdenso	b_int	bsecun	Cafsomb	pad	psa	ca	zurb
bdenso	0.5	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0
bd_int	0.0	0.5	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0
bsecun	0.0	0.0	0.4	0.0	0.4	0.1	0.0	0.0
Cafsomb	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
pad	0.1	0.1	0.1	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0
psa	0.0	0.0	0.2	0.0	0.4	0.4	0.0	0.0
ca	0.0	0.1	0.0	0.0	0.3	0.0	0.6	0.0
zurb	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9

Bosques densos sin intervención (bdenso), bosques densos intervenido (bd_int), bosques secundarios recientes (bsecun), café con sombra (cafsomb), pastos con árboles dispersos (pad), pastos sin árboles (psa), cultivos anuales (ca) y zona urbana (zurb).

3.5.6 Matriz de transición de uso del suelo para el año 2030

En el cuadro 8, se muestra la matriz de transición de los cambios de uso del suelo que se espera para los próximos 20 años, donde se analizaron la transformación de las diferentes categorías. Las áreas señaladas en diagonal y de color verde, representa la superficies que van permanecer intactas hasta el año 2030. Mientras tanto, las columnas representan las ganancias de superficies y las filas las pérdidas; por lo tanto, los usos que mostraran mayor transición fueron los pastos sin árboles y los bosques secundarios recientes en 1377.5 y 607.5 ha respectivamente para transformarse a pastos con árboles dispersos.

Cuadro 8. Matriz de transición esperada de uso del suelo para el 2010-2030 (hectáreas)

Uso del suelo	bdenso	b_int	bsecun	Cafsomb	pad	psa	ca	zurb	Total 2010
bdenso	1649.5	158.2	196.7	0.0	0.0	186.0	14.2	0.0	2204.6
bd_int	0.0	1510.2	123.2	0.0	0.3	11.3	0.0	0.0	1645.0
bsecun	0.0	0.0	2173.3	7.2	607.5	0.0	0.0	0.0	2788.0
Cafsomb	3.8	0.0	0.0	314.3	0.0	0.0	0.0	0.0	318.1
pad	184.2	472.6	3.4	0.0	5678.6	0.0	0.0	0.0	6338.7
psa	0.7	0.0	212.4	0.0	1377.5	2151.4	0.0	10.6	3752.6
ca	0.0	8.3	0.0	0.0	13.7	0.0	28.0	0.0	50.0
zurb	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.7	86.3
Total 2030	1844.7	2149.4	2708.8	321.5	7677.5	2348.7	42.2	90.3	17183.2

Bosques densos sin intervención (bdenso), bosques densos intervenido (bd_int), bosques secundarios recientes (bsecun), café con sombra (cafsomb), pastos con árboles dispersos (pad), pastos sin árboles (psa), cultivos anuales (ca) y zona urbana (zurb).

3.5.7 Pérdidas y ganancias de uso del suelo para 2010-30

En la figura 6, se muestra el porcentaje de pérdidas y ganancias de los diferentes usos de suelo para los próximos 20 años; y en la figura 7, se presenta un mapa con la distribución espacial. Donde los pastos con árboles dispersos (pad) tienen la mayor ganancia de superficie en 6.61% y los valores más altos de pérdidas se presentan en los pastos sin árboles (psa) en 5.3%. En la figura 8, se presentan los mapas de uso de suelo para los diferentes periodos.

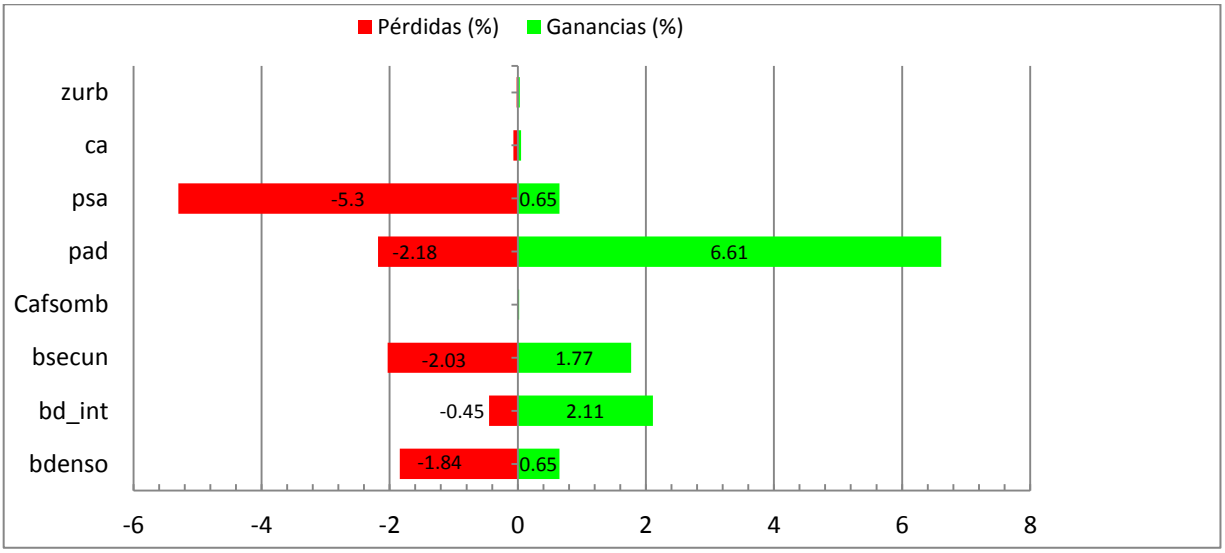

Figura 6. Análisis de las pérdidas y ganancias de usos del suelo para 2010-30

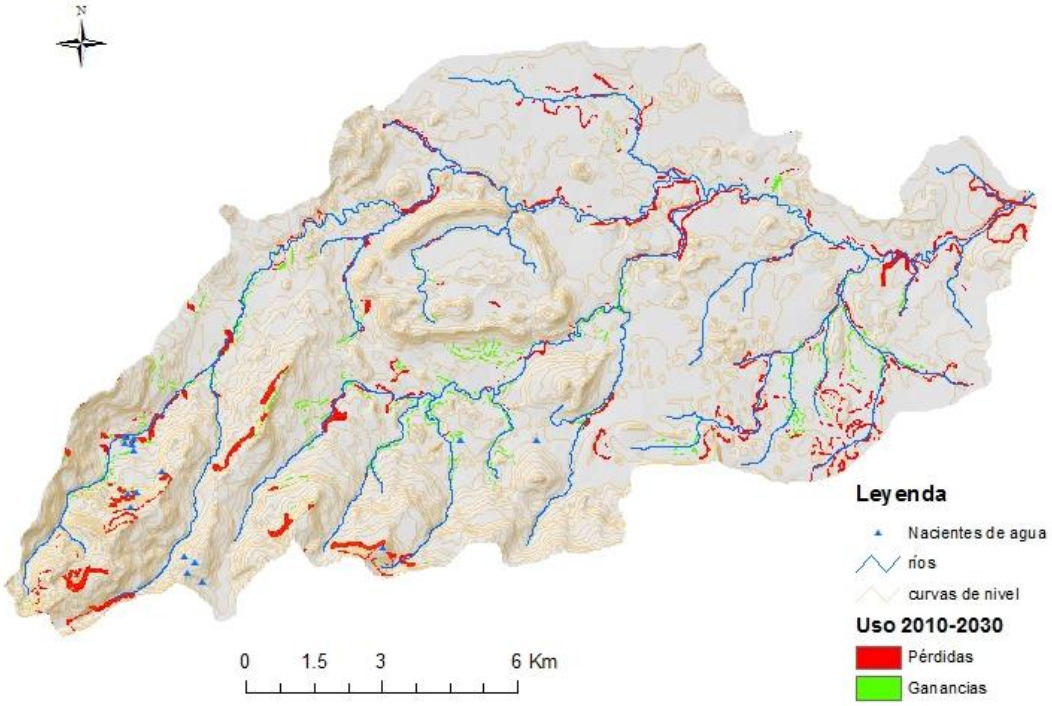

Figura 7. Mapas de pérdidas y ganancias de usos del suelo para 2010-30

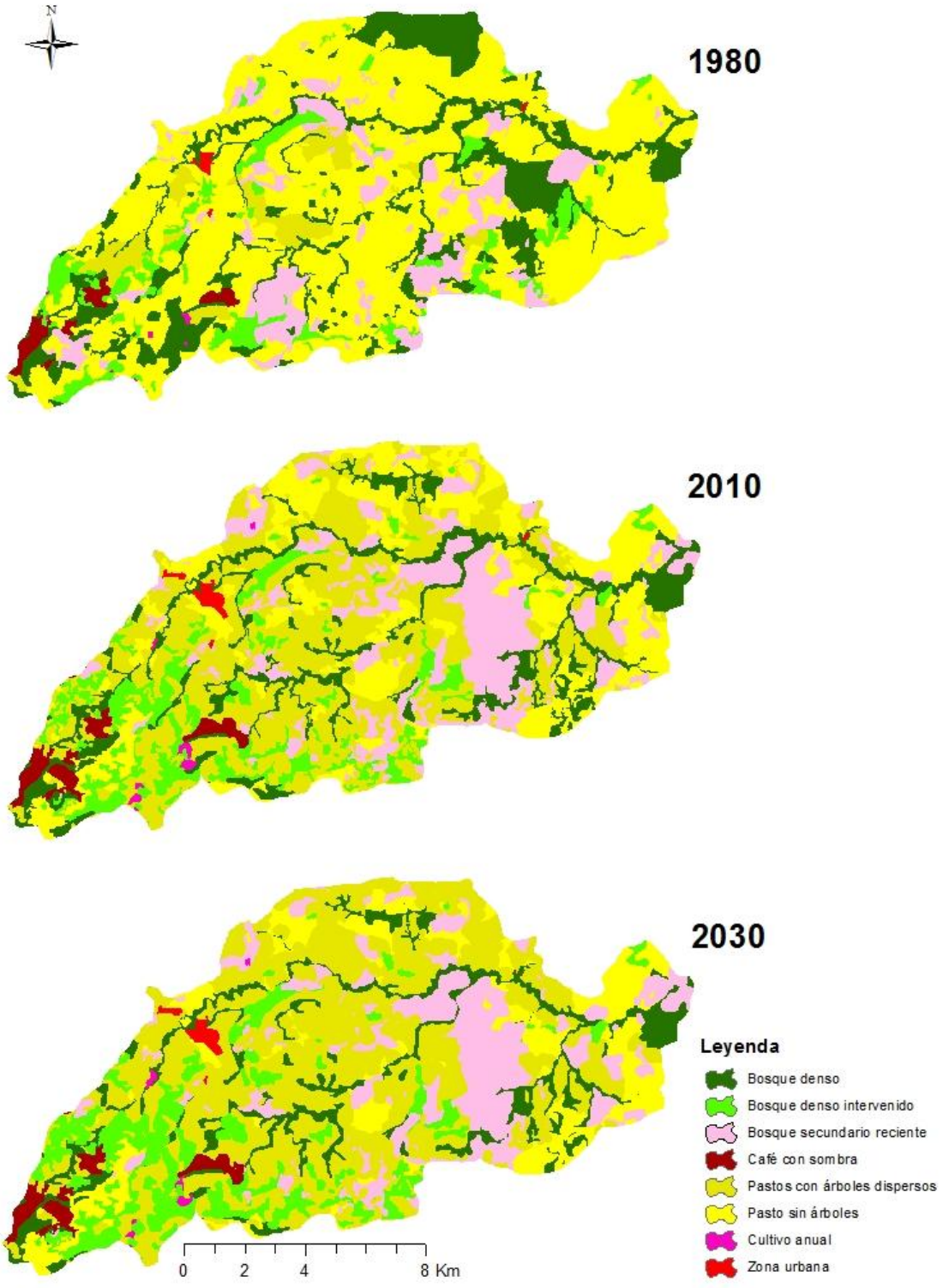

Figura 8. Dinámica de cambios de uso del suelo en 1980, 2010 y 2030

3.6 Discusiones

Los mapas de uso de suelo comparados entre 1980 y 2010, las áreas con mayor extensión fueron en un inicio con pastos sin árboles (psa) y luego con pastos con árboles dispersos (pad), esta actividad económica ha producido la mayor deforestación para la ampliación de la ganadería en la zona. Sin embargo, las áreas con actividades ganaderas presentan casi la misma extensión, con 10740.2 ha (1980) a 10091.3 ha (2010), representando una superficie total de 60% para ambos periodos. Por lo tanto, la extensión de pastizales se han mantenido en los últimos 30 años, pero al mismo tiempo ha presentado una mayor transición en los diferentes sectores de la cuenca, de modo que por una parte se ganó áreas para la formación de los bosques secundarios (1612.2 ha) y por otro lado se perdió para ampliar las pasturas (797.1 ha con pad y 233.3 ha con psa). Según Gillespie et al (2000) y Velásquez (2005), mencionan que mayoría de los bosques conservados en Centroamérica, se generan a partir del abandono de las actividades agropecuarias por diferentes intensidades de perturbaciones como fuego, pastoreo y extracción de madera que han recuperado su vegetación boscosa por un periodo de descanso del potrero. Posteriormente, estos bosques son talados y quemados para la instalación de nuevas pasturas; y simultáneamente en sus primeras etapas de crecimiento de los pastos son asociados con los cultivos anuales (maíz o frijol) (Velásquez 2005; ODESAR 2008). No obstante, la renovación de la tasa anual de pasturas en Muy Muy se presentan en 4.8%, mientras la tasa anual de degradación es del 16% (Velásquez 2005); de modo que para compensar estas pérdidas de pasturas (psa) se aperturan nuevas áreas con la tala de bosques (bsecun y bdenso).

La reducción de los bosques densos, se presentó por la transición a diferentes prácticas ganaderas, como los pastos sin árboles (psa) en 490.9 ha y los pastos con árboles dispersos (pad) en 403.7 ha; asimismo, los resultados mostraron una transformación con superficies extensas a bosques intervenidos con 391.3 ha, relacionados con la extracción de especies forestales; y los bosques secundarios recientes en 384.5 ha, es probable que este último se relacione a una transición anterior de pasturas sin árboles. Por lo tanto, según Brown et al (2000), menciona que las actividades ganaderas están relacionado con la reducción de la cobertura forestal. No obstante, estudios similares corroboran los resultados, determinando que la mayor causa de la deforestación en Nicaragua entre 1950 a 2000, fueron por el incremento en la ganadería y la explotación de especies forestales maderables (MAGFOR 2005); además, reportes locales en el municipio de Muy Muy, mencionan que estas actividades fueron incentivadas por la gran demanda de las empresas lecheras y de carne en el departamento de Matagalpa (MAGFOR 2005; ODESAR 2008). Por lo tanto, entre 1980 y 1990, se pierden aproximadamente 4230 ha de bosques para ser remplazadas por ganadería (ODESAR 2008), información que se evidencia con la transformación de bosques para ganadería, ubicados en las comunidades de Olama y Aguas calientes (figura 5).

Mientras tanto, en la parte alta de la cuenca, se presenta una incremento de cultivos de café en un promedio de 106 ha con respecto a los años de 1980 y 2010 con la transición de

pastos sin árboles y bosques secundarios. Estos resultados se corrobora con los estudios locales, señalando que los años 1990 al 2000 se han presentado la ampliación de los cultivos de café en estas zonas (ODESAR 2008).

En cambio, la ganadería tradicional con pastos sin árboles, para los últimos periodos se han presentado la mayor intensidad de transición para pastos con árboles dispersos (PAD) por regeneración natural, alcanzando un total de 5546.9 ha en los últimos 30 años. Por lo tanto, según Pezo y Ibrahim (1996) estos sistemas son la forma de producción bovina más común en américa central. Por lo tanto, la regeneración natural de árboles se realizan con el fin de proporcionar sombra y alimento al ganado, así como para obtener productos maderables (Pezo y Ibrahim 1996; Esquivel 2005; Velásquez 2005), debido que son una fuente importante de forraje durante la época seca (Velásquez 2005).

La simulación futura de uso del suelo para el 2030, mediante cadenas de markov y cellular autómata, muestran una tendencia en el incremento para las categorías de pastos con árboles dispersos (pad), bosques intervenidos (bd_int) y bosques secundarios recientes (bsecun) estas transiciones reducen indirectamente los bosques densos (bdenso) en 1.84% para los próximos 20 años, teniéndose que en cuenta que las matrices de cambio continúen con la misma intensidad entre 1980 y 2010. Según Feldman (2005), los modelos de markov y cellular autómata son capaces de responder preguntas reales de los cambios futuros de uso del suelo. Así mismo, permite identificar los posibles impactos en el futuro (Benito *et al.* 2010), de modo que es una herramienta de primer orden para la toma de decisiones en el territorio (Neijemer y De Groot, 2008).

3.7 Conclusiones

Las causas más importantes que han determinado los cambios de uso del suelo en la cuenca del río Compasagua entre los periodos (1980-10), fueron más por las actividades ganaderas. Pero sin embargo, estas prácticas vienen experimentando un proceso de transformación a prácticas ganaderas más sostenibles, con la asociación de pastos con árboles dispersos manejados desde la regeneración natural.

En cuanto la dinámica de los bosques secundarios recientes, bosques densos intervenidos o bosques densos es muy temporal; de modo que la mayor parte de ellos se van incrementando a medida que se producen con el abandono de las pasturas, y al mismo tiempo para compensar esta reducción se apertura nuevas áreas en diferentes sectores de la cuenca interviniendo los bosques; por otra parte, también se muestran afectadas por las actividades agrícolas (cultivo anual y café) que se concentran en mayor extensión en la cuenca alta, sobre todo en terrenos ondulados donde se encuentran los bosques densos.

En cambio los bosques densos para los últimos 30 años se han reducido aproximadamente en 31% con respecto a su superficie inicial, y con mayor intensidad en la parte alta, y mediante la simulación futura se espera una reducción para los próximos 20 años en 16%. Esto marca la gran importancia de establecer políticas o un marco regulatorio para hacer cumplir las leyes existentes para la conservación de estos bosques debido que la mayor parte de ellos aún mantienen sus características originales y son necesarios para la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

La simulación futura para el año 2030, muestra un comportamiento tendencial con respecto al incremento de los pastos con árboles en aproximadamente en 21% de su superficial del 2010; por lo que se destaca la regeneración natural en la mayor parte de pasturas sin árboles (1377 ha), transformándose a pastos con árboles.

3.8 Recomendaciones

La intensificación de la ganadería en la zona de estudio, podría ser uno de los agentes más importantes que reduzca la deforestación, y permita la restauración de los bosques. Por lo que es necesaria la búsqueda de nuevos mecanismos y estrategias para una práctica ganadera más sostenible.

Los relictos de bosques densos que aún permanecen deben considerarse como áreas de conservación porque en la mayor parte de ellas se encuentran las fuentes de agua de la cuenca.

El cumplimiento del marco regulatorio que establecen la protección de los bosques de riberas de los ríos y la ley de aguas para una mejor gestión del territorio.

3.9 Bibliografía

Aaviksoo, K. 1993. Changes of plant cover and land use types (1950's to 1980's) in three mire reserves and their neighbourhood in Estonia. Landscape Ecology 8(4):287-301.

AMUPNOR, (Asociación de Municipios Productivos del Norte). 2010. Diagnóstico del plan de ordenamiento y desarrollo territorial - Muy Muy. 152 p.

Aronoff, S. 2005. Sensing for GIS Managers. California, ESRI Press.

Benito, PR; Cuevas, J; de la Parra, RB; Prieto, F; del Barrio, JMG; Zavala, M. 2010. Land use change in a Mediterranean metropolitan region and its periphery: assessment of conservation policies through CORINE Land Cover data and Markov models. Forest Systems 19:315-328.

Briassoulis, H. 2000. Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches. The Web Book of Regional Science.

Brown, DG; Pijanowski, B; Duh, J. 2000. Modeling the relationships between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest, USA. Journal of Environmental Management 59(4):247-263.

CEPAL, (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2010. Nicaragua efectos del cambio climático sobre la agricultura. p. 72 p.

Eastman, JR. 2012. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Clark University 17:321 p.

Esquivel, MJ. 2005. Regeneración natural de árboles y arbustos en potreros activos en Muy Muy, Matagalpa, Nicaragua. Tesis Mag.Sc. Costa Rica, CATIE, Turrialba, CR. 142 p.

Fan, F; Wang, Y; Wang, Z. 2008. Temporal and spatial change detecting (1998–2003) and predicting of land use and land cover in Core corridor of Pearl River Delta (China) by using TM and ETM+ images. Environmental monitoring and assessment 137(1):127-147.

FAO, (Food and Agriculture Organization of the United Nations)/Cooperazione italiana/UNEP). 2000. Land cover classificaction and user manual. FAO, Rome.179 p.

Feldman, O; Korotkov, VN; Logofet, DO. 2005. The monoculture vs. rotation strategies in forestry: formalization and prediction by means of Markov-chain modelling. Journal of Environmental Management 77(2):111-121.

Gallego, B. 2002. Estructura y composición de un paisaje fragmentado y su relación con especies arbóreas indicadoras en una zona de de bosque muy húmedo tropical, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Costa Rica, CATIE, Turrialba, CR. 103 p.

Gillespie, TW; Grijalva, A; Farris, CN. 2000. Diversity, composition, and structure of tropical dry forests in Central America. Plant ecology 147(1):37-47.

Kamusoko, C; Oono, K; Nakazawa, A; Wada, Y; Nakada, R; Hosokawa, T; Tomimura, S; Furuya, T; Iwata, A; Moriike, H. 2011. Spatial Simulation Modelling of Future Forest Cover Change Scenarios in Luangprabang Province, Lao PDR. Forests 2(3):707-729.

Kersten, T; Haering, S. 1997. Automatic interior orientation of digital aerial images. Photogrammetric engineering and remote sensing 63(8):1007-1010.

Liang, T; Heipke, C. 1996. Automatic relative orientation of aerial images. Photogrammetric engineering and remote sensing 62(1):47-55.

Lillesand, TM; Kiefer, RW; Chipman, JW. 2004. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons Ltd. v. Ed. 5,

MAGFOR, (Ministerio Agropecuario Forestal). 2005. Valoración forestal Nicaragua 2000. Managua p. 178 p. (Tomo I)

Morgado, A; Dowman, I. 1997. A procedure for automatic absolute orientation using aerial photographs and a map. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing 52(4):169-182.

Morgan, JL; Gergel, SE; Coops, NC. 2010. Aerial Photography: A Rapidly Evolving Tool for Ecological Management. BioScience 60(1):47-59. Disponible en http://www.jstor.org/stable/10.1525/bio.2010.60.1.9

ODESAR, (Organización para Desarrollo Económico y Social para el Área Urbana y Rural). 2008. Análisis de la problemática ambiental municipal de Muy Muy. Nicaragua p. 28 p.

Paine, DP; Kiser, JD. 2003. Aerial photography and image interpretation. New JerseY:John Wiley & Sons p. 632 p. (2 ed.)

Ruiz Benito, P; Cuevas, JA; Bravo de la Parra, R; Garcia del Barrio, JM; Zavala, MA. 2010. Land use change in a Mediterranean metropolitan region and its periphery: assessment of conservation policies through CORINE Land Cover data and Markov models. Forest Systems 19(3):315-328.

Soares-Filho, B; Alencar, A; Nepstad, D; Cerqueira, G; Diaz, V; del Carmen, M; Rivero, S; Solórzano, L; Voll, E. 2004. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém–Cuiabá corridor. Global Change Biology 10(5):745-764.

Tang, J; Wang, L; Yao, Z. 2007. Spatio-temporal urban landscape change analysis using the Markov chain model and a modified genetic algorithm. International Journal of Remote Sensing 28(15):3255-3271.

Teixeira, AMG; Soares-Filho, BS; Freitas, SR; Metzger, JP. 2009. Modeling landscape dynamics in an Atlantic Rainforest region: implications for conservation. Forest Ecology and Management 257(4):1219-1230.

Turner, BL; Meyer, WB. 1991. Land use and land cover in global environmental change: Considerations for study. International Social Science Journal 43(4):669-79.

Velásquez, RA. 2005. Selectividad animal de forrajes herbáceos y leñosos en pasturas naturalizadas en función de épocas, manejo y condición de paisaje en Muy Muy, Nicaragua. Tesis Mag.Sc. Costa Rica CATIE, Turrialba, CR. 77 p.

Veldkamp, A; Lambin, EF. 2001. Predicting land-use change. Agriculture, Ecosystems & Environment 85(1):1-6.

Weng, Q. 2002. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. Journal of Environmental Management 64(3):273-284.

Yang, X; Lo, C. 2002. Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. International Journal of Remote Sensing 23(9):1775-1798.

4 ARTICULO II. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y CAMBIOS DE USO DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO COMPASAGUA, NICARAGUA

4.1 Resumen

Se evaluó los impactos de los cambios de uso del suelo y el cambio climático en los componentes hidrológicos de la cuenca del río Compasagua, situado en el municipio Muy Muy, Nicaragua. El mapa de suelo de 1980, se digitalizó a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas de 1980; y los mapas de uso del 2010 y de zonificación ecológica y económica (ZEE) se han obtenido de los trabajos realizados por la Asociación de Municipios Productivos del Norte (AMUPNOR). La proyección futura de uso del suelo (2030), se ha obtenido a partir la modelación de los años de referencia (1980, 2010) mediante las cadenas de markov y cellular automata, teniéndose en cuenta que la intensidad de transición se presenta de igual magnitud en ambos periodos. Para la evaluación hidrológica se utilizó la herramienta Soil and Water Assessment Tools (SWAT), que se analizaron de tres maneras: primero, con el ingreso de mapas de uso de suelo (1980, 2010, 2030) y variables climáticas de 10 años; segundo, se analizó el escenario del 2030 con alteración de las variables climáticas en temperatura y precipitación; con los resultados obtenidos por el CEPAL a partir de los modelos GFDLR30, HADCM3 y ECHAM4 para Nicaragua; tercero, se analizaron los escenarios de ZEE con cambio climático y sin cambio climático.

En esta zona de estudio, la condición de la cuenca del río compasagua ha mejorado en el transcurso del tiempo. Por lo tanto, los resultados mostraron que el cambio de cobertura para los últimos periodos, han tenido un impacto beneficioso, debido a la transición de la mayor parte de pastos sin árboles a pastos con árboles dispersos. La simulación con los diferentes escenarios de uso, indican que las pasturas sin árboles y con bajas coberturas, presentan los niveles más alto de escorrentía y producción de sedimentos, y al mismo tiempo valores muy bajos de recarga de acuíferos, estas condiciones hidrológicas se mejoran cuando se cambian a pastos asociados con árboles, pero aún más con la ZEE. Mientras tanto, con modelos de cambio climático, la cuenca se muestra muy alterada para ambos escenarios (2030 y ZEE). El modelo GFLDR30 incrementa los niveles altos de escorrentía y producción de sedimentos por el aumento de la precipitación en 31.8%; en cambio el HADCM3 con reducción de la precipitación en -16%, disminuye la producción de agua en 25%, por los niveles bajos de recarga de acuíferos. Sin embargo, el ECHAM4 presenta un comportamiento similar al clima normal. Por lo tanto, los componentes hidrológicos son más sensibles al cambio climático que al cambio de uso del suelo, de modo que las estrategias de adaptación deben enfocarse a la gestión del agua y en la conservación de los bosques que aún persisten.

Palabras clave: SWAT, cambio climático, uso de suelo, GFLR30, HADCM3, ECHAM4

4.2 Introducción

En Nicaragua se presente una alta vulnerabilidad a impactos del cambio climático, por la pobreza extrema que presenta el país. No obstante, el 30% de los agricultores practica una agricultura de subsistencia, donde las variaciones en el clima serían un problema muy grande en su sustento de vida (CEPAL 2010a). Estudios recientes sobre el impacto del cambio climático a escala nacional, determinaron que la disponibilidad de agua para el 2100 pueden presentar una reducción de 63%, si no se toma ningunas medidas de gestión del agua (CEPAL 2010b). Mientras tanto, estudios de modelación de cambios de uso del suelo a nivel nacional, estiman para el año 2100, un incremento del área de agricultura y pastoreo en más de 70%, que reducirían los arbustos/sabanas en 90%, y los bosques tropicales disminuiría en 40%. Por otra parte, los problemas de contaminación de los acuíferos, disminución de la calidad del agua, las sequías e inundaciones se ven cada vez más frecuentes a causa de las actividades agropecuarias (cambios de uso) y la escasa gestión del recurso hídrico, y podrían agudizar aún más esta problemática con los impactos del cambio climático (CEPAL 2011).

La modelación hidrológica permite dar una vista más comprensiva de los problemas en la disponibilidad del recurso hídrico, de modo que proporciona una amplia gama de factores que deben ser considerados en la gestión del recurso hídrico como en el uso presente y futuro. Actualmente existen diversos modelos hidrológicos, pero pocos con capacidades de analizar alternativas para una adecuada gestión del agua, que permita contribuir a tomar decisiones para la intervención, mediante la estimación de tendencias y escenarios del clima y cambios de uso del suelo sobre el recurso hídrico (Notter *et al.* 2007). No obstante, los pronósticos de variaciones climáticas a periodos largos, son relevantes para una buena planificación del recurso hídrico (Candela *et al.* 2009); pero el comportamiento de las futuras condiciones hidrológicas requieren de la comprensión de los efectos combinados de los cambios del clima y el cambio de uso del suelo (Juckem *et al.* 2008). Por lo tanto, estudios hidrológicos se han vuelto una necesidad para desarrollar proyectos sostenibles, de modo que pueda entenderse como podría verse afectada el recurso hídrico con las actuales variaciones del clima, ante un crecimiento de explotación de agua subterránea, escasez de agua superficial, cambios de uso de suelo, crecimiento económico, etc. Inclusive, evaluar los impactos con supuestos alternativos de manejo de la cuenca, para un mejor diseño de estrategias de adaptación al cambio climático y la gestión integrada del recurso hídrico.

En el presente estudio se utilizó el modelo Soil and Water Assessment Tools (SWAT) (Arnold y Fohrer 2005; White y Chaubey 2005; Li *et al.* 2009), con el objetivo de analizar y cuantificar los impactos de cambios de uso del suelo, las propuestas de manejo (ZEE) y los efectos del cambio climático sobre la hidrología de la cuenca; de modo que esta información contribuya para la gestión integrada del recurso hídrico; además, de la aplicación y validación del modelo hidrológico como el SWAT.

4.3 Área de estudio

4.3.1 Localización del área de estudio

La cuenca del río Compasagua tiene un área de 170km^2 y está ubicada en el municipio de Muy Muy, al sur del departamento de Matagalpa, a una distancia aproximada de 56 km y de 148 km de la capital de Managua (AMUPNOR 2010); con coordenadas geográficas de 12° 40’ y 12° 60’ latitud Norte y 85° 30’ y 85° 45’ de longitud Oeste, con una altitud promedio de 270 y 650 m.s.n.m. La población actual a nivel de municipio es de 14721 habitantes, donde 10684 (73%) está representada por población rural y el 4037 por la población urbana (17%) (AMUPNOR 2010). Presenta un clima de bosque subhúmedo tropical, con una precipitación que no superan los 2000 mm anuales. El periodo húmedo es entre los meses de mayo a noviembre y el periodo seco es de diciembre a abril con temperaturas medias anuales que oscila entre 23 a 28°C. Se caracteriza por presentar bosques perennifolios de zonas secas y húmedas; con respecto a la topografía es muy variada con predominio de suelos ondulados de 20399 ha (55%), y suelos planos de 16265 ha (43%) y zonas abruptas de 874 ha (2%) y la principal actividad económica es la ganadería (AMUPNOR 2010).

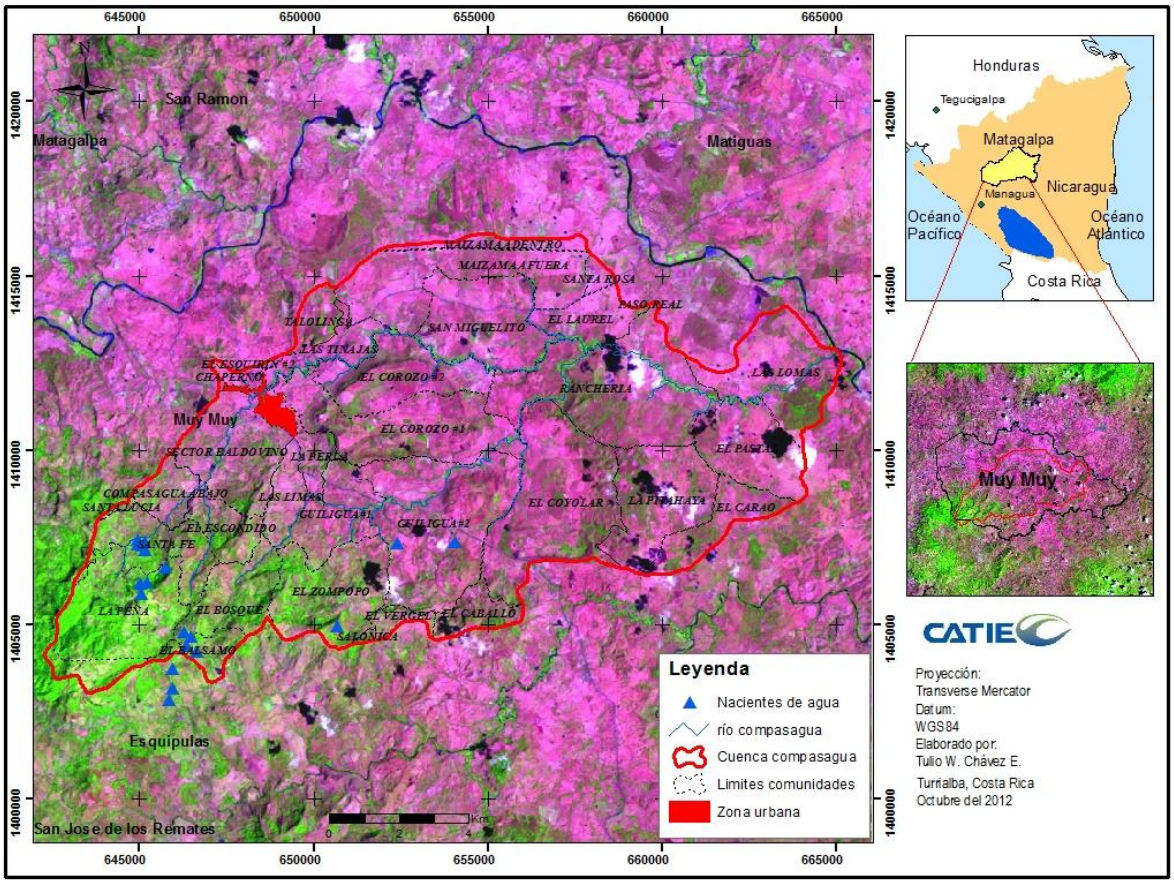

Figura 9. Ubicación del área de estudio

4.4 Procedimiento metodológico

4.4.1 Preparación de datos para el SWAT

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) requiere de información espacial, datos de topografía del terreno, que se determina a partir del modelos de elevación digital (DEM) (Setegn *et al.* 2008), uso de suelo, parámetros hidrológicos de los suelos y datos diarios de clima.

Cuadro 9. Datos usados en el SWAT para modelación de cada escenario de uso suelo

Datos usados	**Características de la información**
Mapa de uso de suelo 1980	12 fotografías aéreas de 1980 (INETER)
Mapa de uso de suelo 2010	01 Imágenes spot de 2.5 resolución/AMUPNOR
Mapa de uso de suelo 2030	Modelación de con markov y cellular automata
Mapa de zonificación	AMUPNOR escala 1:50000
Modelos de elevación digital	Generación de cartografía escala 1:50000
Mapa de suelos	INETER escala 1:50000
Clima	01 Estación meteorológica (INETER)

4.4.2 Ingreso de datos de uso del suelo

Es un factor importante que afecta los diferentes procesos en la cuenca, como la escorrentía superficial, erosión, recarga y evapotranspiración (Setegn *et al.* 2008). La cobertura fue generada a 10 m de resolución. Los datos usados para la base de SWAT, se muestran en el cuadro 10.

Cuadro 10. Tipo de coberturas usadas en el SWAT por clasificación de usos de suelo

Descripción - SWAT	**USO DE SUELO**	**ZEE**
Forest evergreen	Bosques densos sin intervención	Zona forestal de conservación /protección hídrica
Forest mixed	Bosques densos intervenido	Zona forestal de aprovechamiento
Range brush	Bosque secundarios recientes	
Café *	Café con sombra	Zona agroforestal
Range grasses*	Pastos con árboles dispersos	Zona agrosilvopastoril
Range grasse*	Pastos sin árbol	
Agricultural land generic	Cultivos anuales	
Residential med/low density	Zona urbana	Zona urbana

* Se ha modificado las condiciones hidrológicas según la apreciación de las áreas; ZEE: Zonificación ecológicas y económica

4.4.3 Ingreso de datos de suelo

Se ha utilizado la información del grupo de perfil de suelo generado por el INETER (figura 10), y el muestreo de suelos (textura, pH, estructura, materia orgánica, color, densidad aparente) realizado por el proyecto Mesoterra-CATIE en el 2004-07. Los parámetros hidrológicos como la conductividad hidráulica y el agua disponible, se calcularon a partir de la textura y densidad aparente usando el SPAW (Soil Water Characteristics Program); y el factor de erodibilidad a partir del monograma Wischmeir (Wischmeir y Smith 1978).

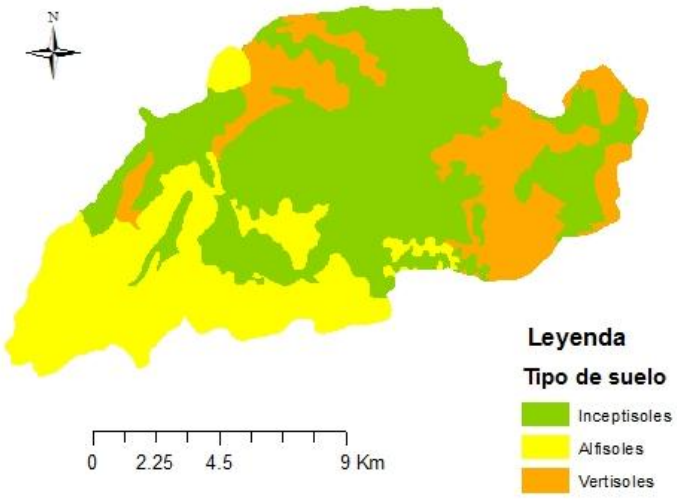

Figura 10. Mapa de tipo de suelo

4.4.4 Ingreso de datos de clima

Se han generado tablas a partir de la digitalización de datos de precipitación diaria, temperatura máxima y mínima, velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa registrados de una estación meteorológica del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) para los años de 2000 al 2010. Posteriormente está información fue ingresado a la base de datos del SWAT.

4.4.5 Escenario de cambio climático y demanda futura del agua

Se utilizó los datos de cambio climático a nivel del país para escenarios A2 (el crecimiento económico y poblacional se mantiene igual) (CEPAL 2011), no se utilizó el B2, asumiendo que no se presentaría ninguna solución local con respecto a la mitigación del cambio climático.

Se procesó la información de las variaciones de cambio climático estimadas por los diferentes modelos, con base a los registros clima (2000 -10), mediante la multiplicación de la precipitación diaria con el porcentaje variación y la temperatura máxima y mínima diaria se

le ha sumado el incremento anual. En el cuadro 11, se muestran los datos que fueron utilizados para el cambio climático.

Cuadro 11. Cambios en temperatura y precipitación para el 2030 en Nicaragua (A2)

Modelos	**Cambios en temperatura °C**
HADCM3	0.9
GFDLR30	0.8
ECHAM4	0.9
Modelos	**Cambios en precipitación (%)**
HADCM3	-16
GFDLR30	31.8
ECHAM4	-1.2

Cálculo de la demanda futura de agua:

Se calculó la demanda agua en base a los registros diarios de los servicios de agua potable en la zona urbana del municipio de Muy Muy por la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL), por la falta de información de consumo de agua en la zona rural se estimó un promedio para ambos de 138 litros/día. En cambio, la demanda de agua para el ganado se estimó en función a las entrevistas realizadas en campo, cuyo promedio de consumo es de 35 litros/día. La población para el 2030, fue calculada teniéndose en cuenta la tasa de crecimiento anual de 1.86% de los informes del Instituto de Información de Desarrollo (INIDE), y la ganadería se estimó teniéndose en cuenca el tamaño de la cuenca y la cantidad de cabezas de ganado registrados por el municipio. El cuadro 12, se muestran los cálculos estimados para el consumo humano y ganadería en el 2030.

Cuadro 12. Demanda de agua para el 2030

Consumo humano (habitante)	**Cantidad**	**Consumo lt/día/unid**	**Consumo subtotal m3/s**
Ganadería (cabezas)	11500	35	0.046
Consumo humano (habitante)	16106	138	0.025
Total			0.07

4.4.6 Cambios de uso del suelo

Los mapas de uso de suelo de 1980, se han digitalizado a partir de un mosaico de fotografías aéreas ortorectificadas escala 1:40 000. Mientras tanto, el mapa del 2010 y el de zonificación ecológica y económica (ZEE) se han obtenidos de los trabajos realizados por AMUNPNOR. Posteriormente la información fue validada con visitas *in situ*; luego la información cartográfica fue ajustada en base a criterios de clasificación (cuadro 3) por FAO (2000) y Gallego (2002) . Finalmente, se realizó la modelación con las cadenas de markov y cellular automata para las proyecciones de cambios futuros de uso de suelo (2030).

4.4.7 Modelación y cálculos de los componentes hidrológicos

Para la modelación en el SWAT, se utilizó el DEM, mapas de suelo, mapa de uso, datos climáticos diarios y de cambio climático. Para evaluar los impactos de cambio de uso, se utilizó la información de los diferentes escenarios (1980, 2010 y 2030) para medir la respuesta hidrológica con los registros de datos clima de 10 años (2000-10); posteriormente se realizó la simulación en el SWAT con el escenario de uso del 2030, con los impactos del cambio climático en la variación diaria del clima; asimismo, con la simulación de la ZEE.

Los cálculos de los siguientes parámetros en SWAT se realizan de la siguiente manera. En el contenido de agua en el suelo:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i}^{t}(R - Q_s - ET - w - Q_g)$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm) en el tiempo t, SW_0 es el contenido inicial de agua en el suelo en el día i (mm), t es tiempo (días), R es la precipitación diaria (mm), Q_s es la cantidad de escorrentía superficial en un día i (mm), ET es la cantidad evapotranspiración en día i (mm), w es la infiltración del agua a la zona no saturada del perfil del suelo en un día i(mm), y Q_g es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mm) (Neitsch *et al.* 2005; Miller *et al.* 2007).

En la escorrentía superficial:
La estimación de la escorrentía dentro del SWAT es por la ecuación de la Curva Número (SCS) que describen como:

$$Q_s = \frac{(R - I_a)^2}{R - I_a + S}$$

Donde Q_s es la escorrentía superficial total acumulada (mm), R es la precipitación diaria (mm), I_a es la infiltración y la intercepción antes de la escorrentía (mm), S es un parámetro de retención base que está en función de la permeabilidad del tipo de suelo, uso del suelo y la cubierta vegetal. Estimaciones de I_a y S son comúnmente derivados de tablas de consulta (Miller *et al.* 2007).

En la evapotranspiración:
Para el cálculo de la evapotranspiración de utilizo el método de Penman-Monteith, (Heuvelmans *et al.* 2005; Kalin y Hantush 2006).

La cantidad de escorrentía superficial liberada en el cauce principal:

$$Q_{ch,i} = \left(Q_{surf,i} + Q_{stor,i-1}\right) * (1 - e^{-surlag/t_{conc}})$$

Donde $Q_{ch,i}$ es la cantidad de escorrentía superficial de descarga en el cauce principal durante el i (mm); $Q_{surf,i}$ es la cantidad de escorrentía superficial generada en la subcuenca durante el día i (mm); $Q_{stor,i-1}$ es la cantidad de escorrentía almacenada o retardado a partir del día

anterior i-1 (mm); $surlag$ es el coeficiente escorrentía superficial; t_{conc} es el tiempo de concentración para la subcuenca (Neitsch *et al.* 2005; Kalin y Hantush 2006).

La recarga de acuíferos:

$$w_{rchrg,i} = \left[1 - e^{-1/\delta_{gw}}\right] * w_{seep,i} + e^{-1/\delta_{gw}} * w_{rchrg,i-1}$$

Donde $w_{rchrg,i}$ es la cantidad de recarga que entra a los acuíferos al día i (mm) δ_{gw} es el tiempo de demora o tiempo de desagüe de los formaciones geológicas sobreyacentes (días); $w_{seep,i}$ cantidad total de agua que sale del fondo del perfil del suelo en el día i (mm), y $w_{rchrg,i-1}$ es la cantidad de recarga que entra a los acuíferos en el día i-1(mm) (Neitsch *et al.* 2005; Kalin y Hantush 2006).

Para la producción de sedimentos, se utiliza la ecuación universal de pérdida de suelo (Williams 1995)

$$sed = 11.8\ (Q_{surf} * q_{peak} * area_{hru}) * 0.56 * K_{usle} * C_{usle} * P_{usle} * LS_{usle} * CFRG$$

Donde sed es la producción de sedimento en un día dado (toneladas métricas), Q_{surf} es el volumen de escorrentía (mm H2O/ha), q_{peak} es la escorrentía máxima (m3/s), $area_{hru}$ es el área del HRU (ha), K_{usle} es el factor de erosibilidad del suelo (0.013 tonelada métrica m2 hr/(m3-tn métrica cm)), C_{usle} es el factor de cobertura vegetal, P_{usle} es el factor de la prácticas de conservación, LS_{usle} es el factor topográfico, $CFRG$ es el factor de fragmento grueso.

4.4.8 Comparación de caudal base estimado por SWAT y con mediciones en campo

Por falta de información de registros de caudales diarios no se realizó la calibración. Al respecto Di Luzio *et al*. (2005), señalan que el SWAT presenta resultados prudentes en la estimación de la escorrentía superficial y la producción de sedimentos, aún sin calibración. Por lo tanto, se ha visto conveniente comparar con el promedio mensual de caudales base de salida en el SWAT de los últimos 10 años, entre los meses de Abril a Mayo (figura 11), con el promedio de 9 puntos de aforos medidos cerca a la desembocadura de la cuenca del rio Compasagua coincidentes a la misma fecha. Teniéndose en cuenta que en estos meses de evaluación el aporte en caudal de la precipitación y la escorrentía superficial es casi nulo.

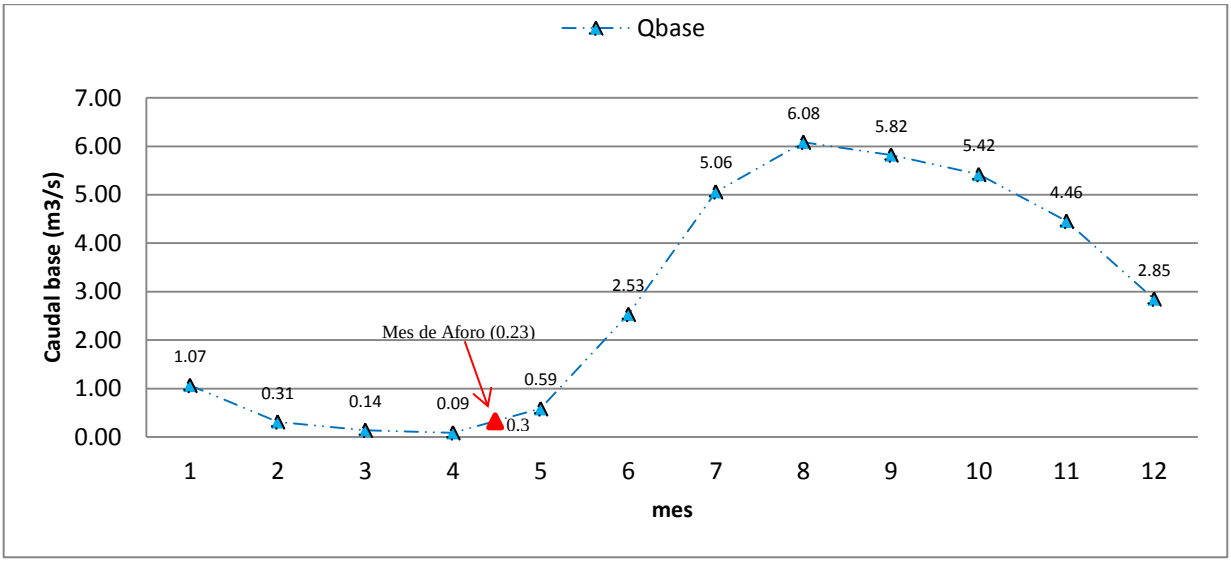

Figura 11. Promedio mensual de caudal base de 10 años (2000-10) mediante SWAT

4.5 Resultados

4.5.1 Evaluación de los cambios de uso de suelo

En el cuadro 13, se muestra los resultados de los cambios de uso de suelo que han variado históricamente, de modo que en el año de 1980 la cobertura del suelo se presenta con la mayor dominancia de pastos sin árboles (58%) y bosques densos (19%). Y para los últimos 30 años el cambio de uso ha significado el incremento de los pastos con árboles dispersos, en aproximadamente 32% con respecto a 1980, al mismo tiempo se ha producido la disminución de los pastos sin árboles en 36%; en cambio, los otros usos experimentaron los menores porcentajes de variación. Mientras tanto, para el escenario del 2030, se espera un incremento de 8% para los pastos con árboles y la disminución de 14% por los pastos sin árboles, con respecto al 2010.

Cuadro 13. Comparación de uso del suelo en diferentes periodos

Uso de suelo	1980		2010		2030	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Bosques densos	3184.5	18.53	2204.6	12.83	1844.7	10.74
Bosques densos intervenido	1190.9	6.93	1645	9.57	2149.4	12.51
Bosques secundarios recientes	1799.6	10.47	2788	16.23	2708.8	15.76
Café con sombra	212.1	1.23	318.1	1.85	321.4	1.87
Pastos con árboles dispersos	791.8	4.61	6338.7	36.89	7677.5	44.68
Pasto sin árboles	9948.4	57.90	3752.6	21.84	2348.7	13.67
Cultivo anual	18	0.10	50	0.29	42.2	0.25
Zona urbana	37.9	0.22	86.3	0.50	90.3	0.53

4.5.2 Impactos con escenarios de cambios de uso de suelo

Se analizó la respuesta hidrológica ante los diferentes escenarios de cambio de uso de suelo (1980, 2010, 2030) con base a los datos de clima registrados en los últimos 10 años (2000-10) usando el modelo SWAT. Para este estudio, se asumió que el comportamiento del clima se ha presentado de manera similar para todos los escenarios (cuadro 14).

Cuadro 14. Impactos del cambio del uso del suelo en el promedio anual de los componentes del balance hídrico (mm/año) y producción de sedimentos (tn/ha/año)

Parámetros	Escenarios de uso del suelo			Cambios temporales					
	1980	2010	2030	1980-2010	%	2010-2030	%	1980-2030	%
PRECIP	1525	1525	1525	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
SW	169.69	170.77	171.04	1.08	0.64	0.27	0.16	1.35	0.80
ET	611.3	611.6	610.7	0.30	0.05	-0.9	-0.15	-0.6	-0.10
SURFQ	375.1	284.18	263.25	-90.92	-24.24	-20.93	-7.37	-111.85	-29.82
LATQ	61.2	67.37	66.95	6.17	10.08	-0.42	-0.62	5.75	9.40
PERC	477.58	561.96	584.2	84.38	17.67	22.24	3.96	106.62	22.33
GWQ	480.77	564.52	540.05	83.75	17.42	-24.47	-4.33	59.28	12.33
DA_RECHG	24.04	28.23	29.33	4.19	17.43	1.1	3.90	5.29	22.00
REVAP	16.74	17.13	17.24	0.39	2.33	0.11	0.64	0.5	2.99
TLOSS	3.98	3.5	3.37	-0.48	-12.06	-0.13	-3.71	-0.61	-15.33
WYLD	872.35	867.25	866.88	-5.10	-0.58	-0.37	-0.04	-5.47	-0.63
SEDYLD	58.62	33.49	30.83	-25.13	-42.87	-2.66	-7.94	-27.79	-47.41

Precipitación media anual (PRECIP), contenido de agua en el suelo (SW), evapotranspiración actual (ET), escorrentía superficial (SURFQ), flujo lateral (LATQ), percolación (PERC), recarga de acuífero superficial (QWQ), recarga de acuífero profundo (DA_RECHG), cantidad de agua que retorna del acuífero a la zona de raíz (REVAP), cantidad de agua que se pierde en el transporte (TLOSS), producción de agua en el cauce natural (WYLD) y producción de sedimentos (SEDYLD).

En el cuadro 14, los resultados muestran que la escorrentía superficial, la recarga de acuíferos y la producción de sedimentos, fueron los más sensibles al cambio de uso del suelo. Por lo tanto, entre 1980-10, la escorrentía superficial se ha reducido en 24% (90.92mm) y con respecto entre 2010-30, en 7% (20.93 mm). En cambio, la recarga de acuíferos superficiales entre 1980-10, incrementaron aproximadamente en 18% (83.75mm), para 2010-30, se espera un una reducción en 4% (24.47mm).

En la figura 12 y 13, se agrupó los niveles recarga de acuífero en 5 categorías (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto) de acuerdo al área que representan a nivel de la cuenca. Se observa que los niveles muy bajos fueron los más dominantes en 1980, y para los últimos 30 y 20 años, estas condiciones teóricamente se mejoran a niveles medios por los cambios de coberturas de uso del suelo.

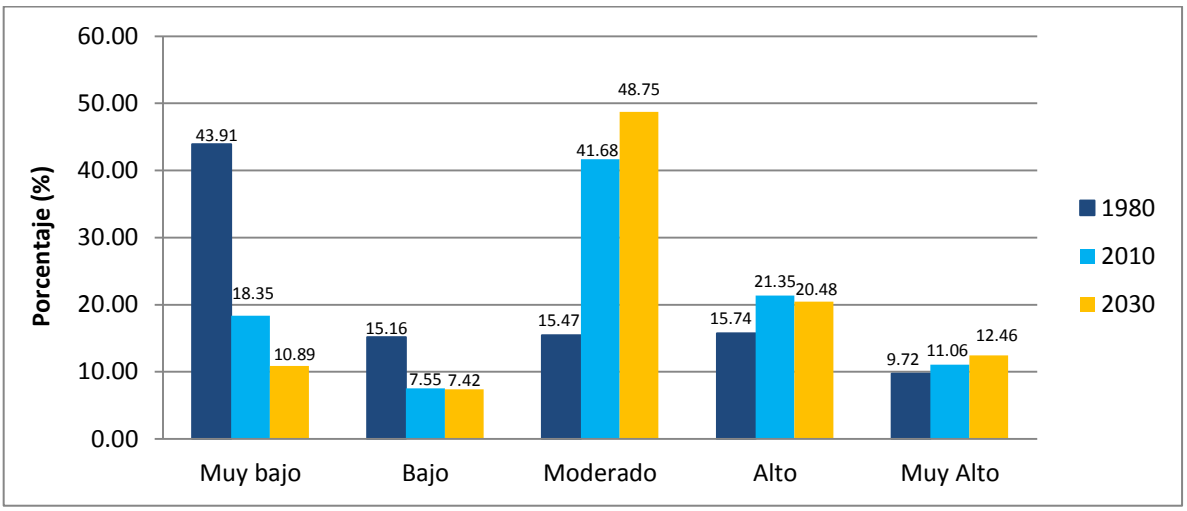

Figura 12. Variación porcentual en los niveles de recarga de acuífero

La producción anual de sedimentos (SEDYLD) (cuadro 13), fue la más alta para el uso de suelo del año de 1980, pero a su vez, la cuenca ha presentado un mejor comportamiento para los siguientes años, con una disminución de 43% (25.13 tn/ha/año) y 47% (27.79 tn/ha/año) con respecto al 2010 y 2030 respectivamente.

En la figura 13, se muestra la distribución en la producción promedio anual de sedimentos en los diferentes subcuencas, mostrándose una mayor producción para los escenarios de 1980 y una reducción para el 2010 y 2030.

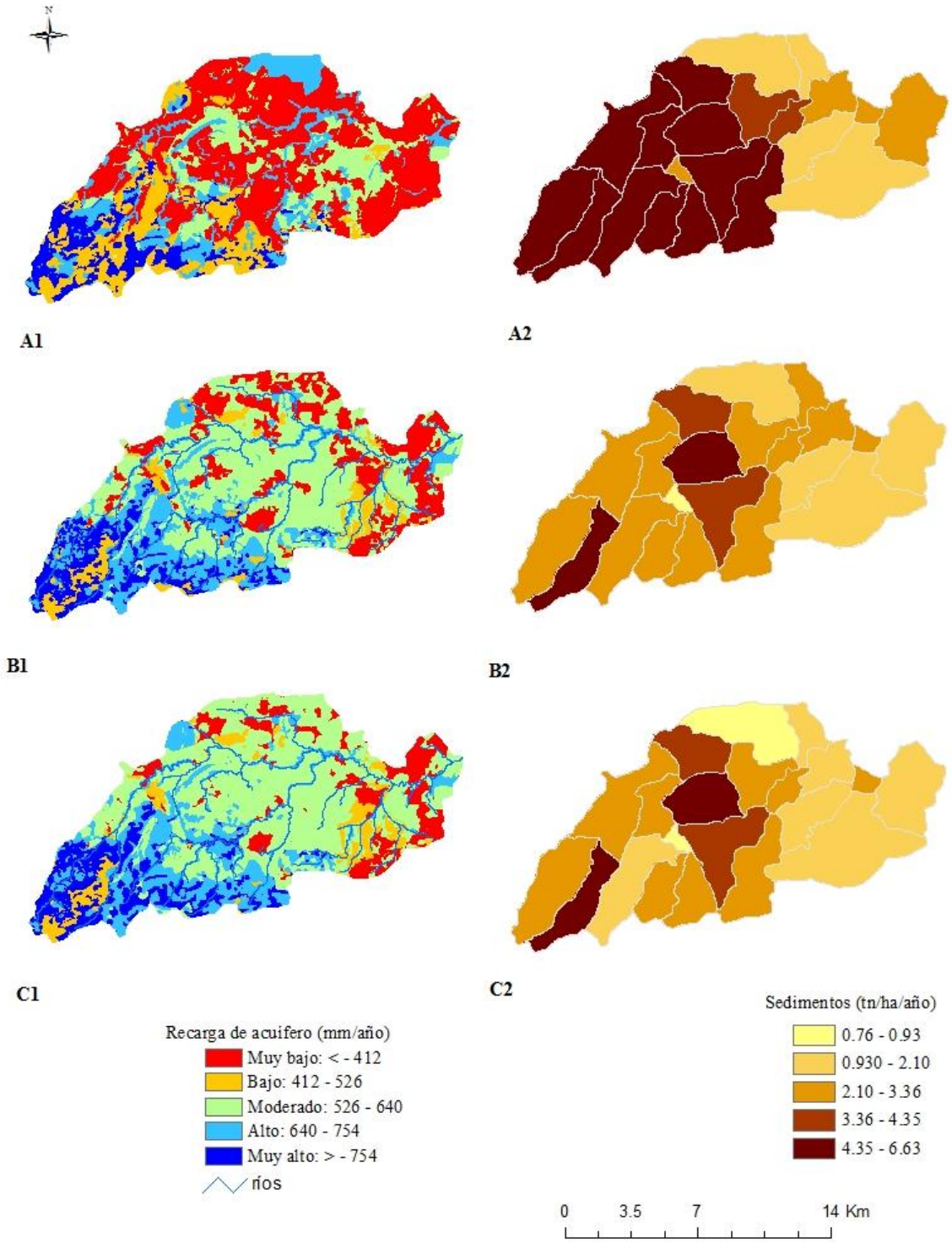

Figura 13. Promedio anual de recarga de acuífero y producción de sedimentos (A1,A2) 2030, (B1, B2) 2010, (C1,C2) 2030

4.5.3 Impactos con escenarios de cambio climático

En el cuadro 15, se muestran los resultados de la modelación usando SWAT con proyecciones de cambio climático estimado por el CEPAL para escenarios A2 (cuadro 11), donde se ha analizado las respuesta hidrológicas ante los diferentes modelos que estiman la variaciones de clima para el 2030 (temperatura y precipitación); así mismo, se utilizó la cobertura de uso del suelo del 2030, los que fueron obtenidos a partir de la modelación de los mapas de uso de suelo de 1980 y 2010 mediante los modelos de cadena de markov y cellular auotomata.

Por lo tanto, el modelo de cambio climático con GFDLR 30, estima un incremento en la temperatura en 0.8 °C y la precipitación en 31.8%; al contrario, el ECHAM4 y HADCM3 estiman un incremento similar en temperatura en 0.9 °C y una reducción en la precipitación con -1.2% y -16% respectivamente.

Cuadro 15. Impactos del cambio climático en el promedio anual de los componentes del balance hídrico (mm/año) y producción de sedimentos (tn/ha/año)

Parámetros	Escenarios de uso del suelo 2030				Cambios temporales					
	SIN CC	GFDLR30	ECHAM4	HADCM3	SIN CC-GFDLR30	%	SIN CC-ECHAM4	%	SIN CC - HADCM3	%
PRECIP	1525	2009.9	1507.9	1281.4	484.90	31.80	-17.1	-1.12	-243.60	-15.97
SW	171.04	184.85	168.36	158.15	13.81	8.07	-2.68	-1.57	-12.89	-7.54
ET	610.7	658.1	619.4	592.7	47.40	7.76	8.7	1.42	-18.00	-2.95
SURFQ	263.25	465.41	254.5	176.23	202.16	76.79	-8.75	-3.32	-87.02	-33.06
LATQ	66.95	87.68	65.45	54.71	20.73	30.96	-1.5	-2.24	-12.24	-18.28
PERC	584.2	798.69	568.69	457.87	214.49	36.72	-15.51	-2.65	-126.33	-21.62
GWQ	540.05	741.45	525.04	420.36	201.40	37.29	-15.01	-2.78	-119.69	-22.16
DA_RECHG	29.33	40.06	28.55	23	10.73	36.58	-0.78	-2.66	-6.33	-21.58
REVAP	17.24	19.32	17.51	16.71	2.08	12.06	0.27	1.57	-0.53	-3.07
TLOSS	3.37	4.14	3.32	2.85	0.77	22.85	-0.05	-1.48	-0.52	-15.43
WYLD	866.88	1290.39	841.66	648.44	423.51	48.85	-25.22	-2.91	-218.44	-25.20
SEDYLD	30.83	67.7	34.7	24.24	36.87	119.59	3.87	12.55	-6.59	-21.38

Precipitación media anual (PRECIP), contenido de agua en el suelo (SW), evapotranspiración actual (ET), escorrentía superficial (SURFQ), flujo lateral (LATQ), percolación (PERC), recarga de acuífero superficial (QWQ), recarga de acuífero profundo (DA_RECHG), cantidad de agua que retorna del acuífero a la zona de raíz (REVAP), cantidad de agua que se pierde en el transporte (TLOSS), producción de agua en el cauce natural (WYLD) y producción de sedimentos (SEDYLD).

En el cuadro 15, los resultados muestran que los impactos de cambio climático en los componentes hidrológicos, los más sensibles fueron: La producción del agua, la escorrentía superficial, la recarga de acuífero y la producción de sedimentos. La producción de agua en la cuenca se incrementa en 49% (423.51mm) con el modelo GFDLR30, con HADCM3 estiman una reducción de 25% (218.44), así con el modelo ECHAM4 se verá una reducción de agua en

3% (25.22mm). En cambio, los resultados de escorrentía superficial presentaron un incremento en 76.79% (202.16 mm) con respecto al escenario base; mientras tanto el modelo HADCM3 muestra un reducción de 3.06 % (87.02 mm) y el ECHAM4 en 3% (8.75 mm). Para la recarga de acuíferos superficiales, con el modelo GFDLR30 estima un incremento positivo en 37% (201.40 mm), pero sin embargo el modelo HADCM3 estima una reducción en 22% (119.69 mm), de igual manera el ECHAM4 en 3% (15.01).

En la figura 14, se muestran la variación porcentual de los niveles de recarga de acuífero con variaciones del clima. El modelo GFDLR30, presenta impactos positivos que incrementan los niveles de recarga de los acuíferos en más de 70% de las superficie total de la cuenca; sin embargo, el modelo HADCM3, presentan los impactos negativos que reducen a niveles bajo de recarga. En cambio, el modelo ECHAMA4 presenta un comportamiento similar al escenario sin cambio climático (SINCC) con variaciones poco perceptibles.

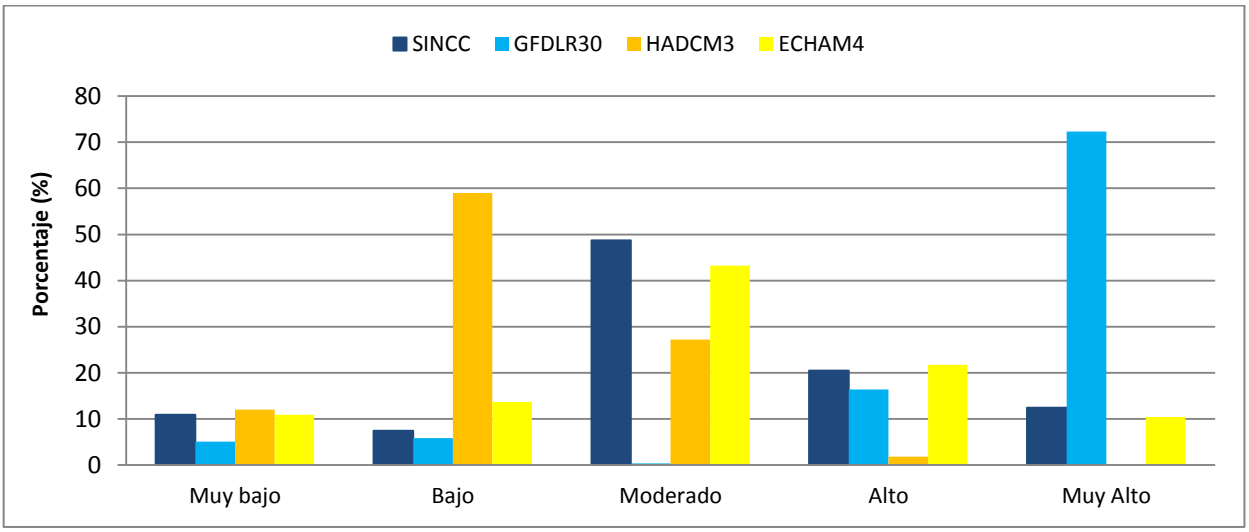

Figura 14. Variación porcentual en los niveles de recarga de acuífero

En la producción anual de sedimentos (SEDYLD) en el cuadro 14, los resultados muestran que la erosión de los suelos se incrementan con el aumento porcentual de la precipitación, de modo que el modelo GFLDR30 los impactos se presentan en más 120% (36.87 tn/ha/año) y en 12.55% (3.84 tn/ha/año) con el ECHAM4. En cambio, con el HADCM3 se espera una reducción en -22% (-6.59 tn/ha/año) con respecto al escenario base (2030). En la figura 15, se observa la distribución espacial de la producción de sedimento a niveles de las subcuencas, mostrándose los niveles más altos para el modelo GFDLR30.

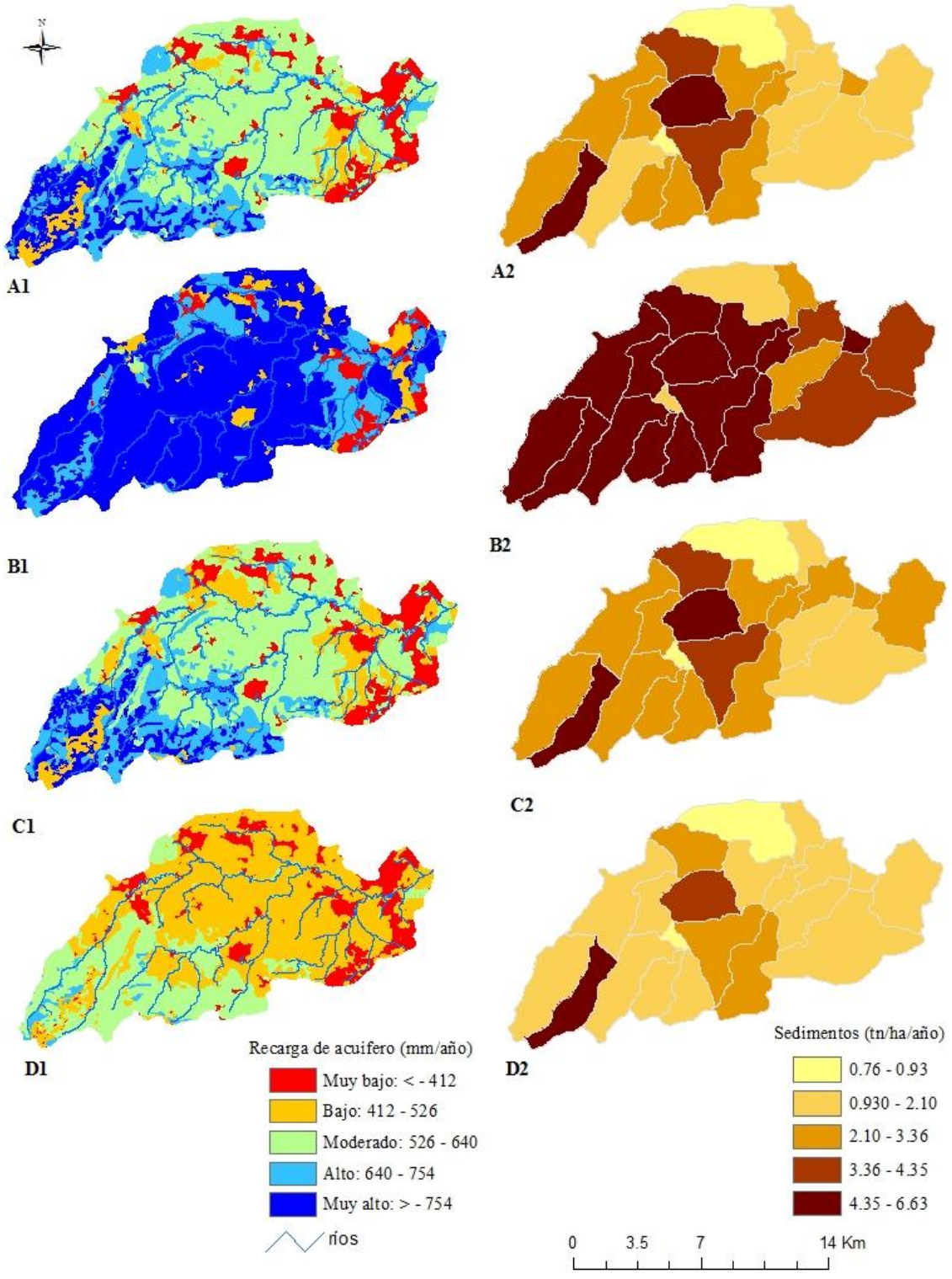

Figura 15. Promedio anual de recarga de acuífero y producción de sedimentos (A1,A2) 2030, (B1, B2) GFDLR30, (C1,C2) ECHAM4, (D1,D2) HADCM3

4.5.4 Impactos con escenarios de cambio climático y manejo de la cuenca

Se analizó los impactos del cambio climático con propuestas de manejo de la cuenca, que consiste en las prácticas agrícolas y ganaderas sostenibles de acuerdo a los mapas de zonificación ecológica y económica (ZEE) elaborados por la asociación de municipios productivos del norte (AMUPNOR) para el ordenamiento territorial del municipio de Muy Muy.

En el cuadro 16, se muestran los resultados de la modelación del balance hídrico para los diferentes de escenarios de cambio climático. Donde los componentes más sensibles fueron: La producción del agua, la escorrentía superficial, la recarga de acuífero y la producción de sedimentos. La variación de los otros parámetros (LATQ, PERC DA_RECHAG, REVAP, TLOSS) tienen una relación directa con la recarga del acuífero.

Cuadro 16. Impactos del cambio climático en el promedio anual de los componentes del balance hídrico (mm/año) y producción de sedimentos (tn/ha/año)

Parámetros	Escenarios con manejo de la cuenca - 2030				Cambios temporales					
	ZONIF	GFDLR30	ECHAM4	HADCM3	ZONIF-GFDLR30	%	ZONIF-ECHAM4	%	ZONIF-HADCM3	%
PRECIP	1525	2009.9	1507.9	1281.4	484.90	31.80	-17.10	-1.12	-243.60	-15.97
SW	169.35	183.79	166.52	156.07	14.44	8.53	-2.83	-1.67	-13.28	-7.84
ET	610.6	658.4	618.6	592.1	47.80	7.83	8.00	1.31	-18.50	-3.03
SURFQ	220.05	402.65	212.23	143.15	182.60	82.98	-7.82	-3.55	-76.90	-34.95
LATQ	69.83	91.98	68.48	57.01	22.15	31.72	-1.35	-1.93	-12.82	-18.36
PERC	624.68	856.79	608.76	489.29	232.11	37.16	-15.92	-2.55	-135.39	-21.67
GWQ	577.82	795.77	562.4	449.5	217.95	37.72	-15.42	-2.67	-128.32	-22.21
DA_RECHG	31.33	42.93	30.53	24.55	11.60	37.03	-0.80	-2.55	-6.78	-21.64
REVAP	17.42	19.54	17.69	16.93	2.12	12.17	0.27	1.55	-0.49	-2.81
TLOSS	2.89	3.63	2.84	2.39	0.74	25.61	-0.05	-1.73	-0.50	-17.30
WYLD	864.81	1286.76	840.27	647.27	421.95	48.79	-24.54	-2.84	-217.54	-25.15
SEDYLD	18.96	40.76	21.25	14.43	21.80	114.98	2.29	12.08	-4.53	-23.89

Precipitación media anual (PRECIP), contenido de agua en el suelo (SW), evapotranspiración actual (ET), escorrentía superficial (SURFQ), flujo lateral (LATQ), percolación (PERC), recarga de acuífero superficial (QWQ), recarga de acuífero profundo (DA_RECHG), cantidad de agua que retorna del acuífero a la zona de raíz (REVAP), cantidad de agua que se pierde en el transporte (TLOSS), producción de agua en el cauce natural (WYLD) y producción de sedimentos (SEDYLD).

En el cuadro 16, los resultados mostraron, que la producción de agua se incrementa con el modelo GFDLR30 en aproximadamente en 49% (421.95mm); en cambio con los modelos HADCM3 estiman una reducción de 25% (217.54mm) y el ECHAM4 en 3 % (24.54 mm). Mientras tanto, en la escorrentía superficial el modelo GFDLR30 estima un incremento anual en 83% (182.60mm), en cambio los modelos HADCM3 estiman reducciones en 35% (76.90 mm) y el ECHAM4 en 4% (7.82 mm). En cambio, la recarga de acuífero con el modelo

GFDLR30 estima un incremento en aproximadamente en 38% (217.95 mm); por el contrario, el modelo HADCM3 estima una reducción en 22% (128.32mm) y en 3% (15.42 mm) por el ECHAM4.

En la figura 16, se muestran las variaciones porcentuales de áreas con niveles de recarga de acuífero para diferentes escenarios de cambio climático. De modo que los niveles muy alto se incrementan con el escenario GFDLR30 en aproximadamente 82 % del área total de la cuenca; en cambio, con el HADCM3 el 66% de las áreas presentan un nivel bajo de recarga y el ECHMA4 se presentan en niveles moderados con 47%, de manera similar con el escenario sin cambio climático en 53%.

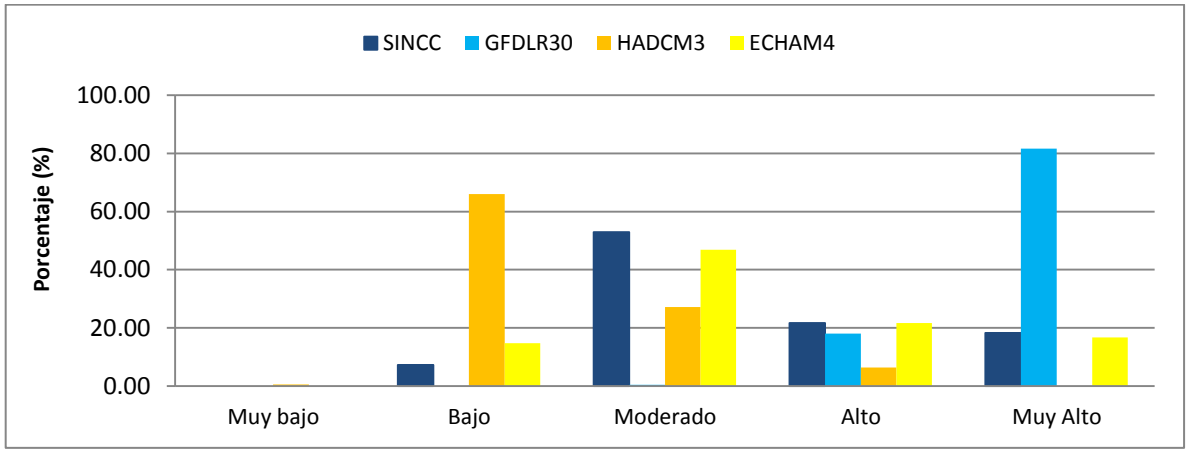

Figura 16. Variación porcentual en los niveles de recarga de acuífero

En cuanto a la producción anual de sedimentos, el modelo GFDLR30, estima un incremento de 115% (21.80 tn/ha), de igual manera con el modelo ECHAM4 en 12% (2.29 tn/ha), en cambio par el modelo HADCM3 se estima una reducción de -24% (-4.53 tn/ha) con respecto al escenario base (2030).

En la figura 17, se muestra la distribución espacial de la producción de sedimento a niveles de subcuenca, para los diferentes escenarios de cambio climático con manejo de la cuenca.

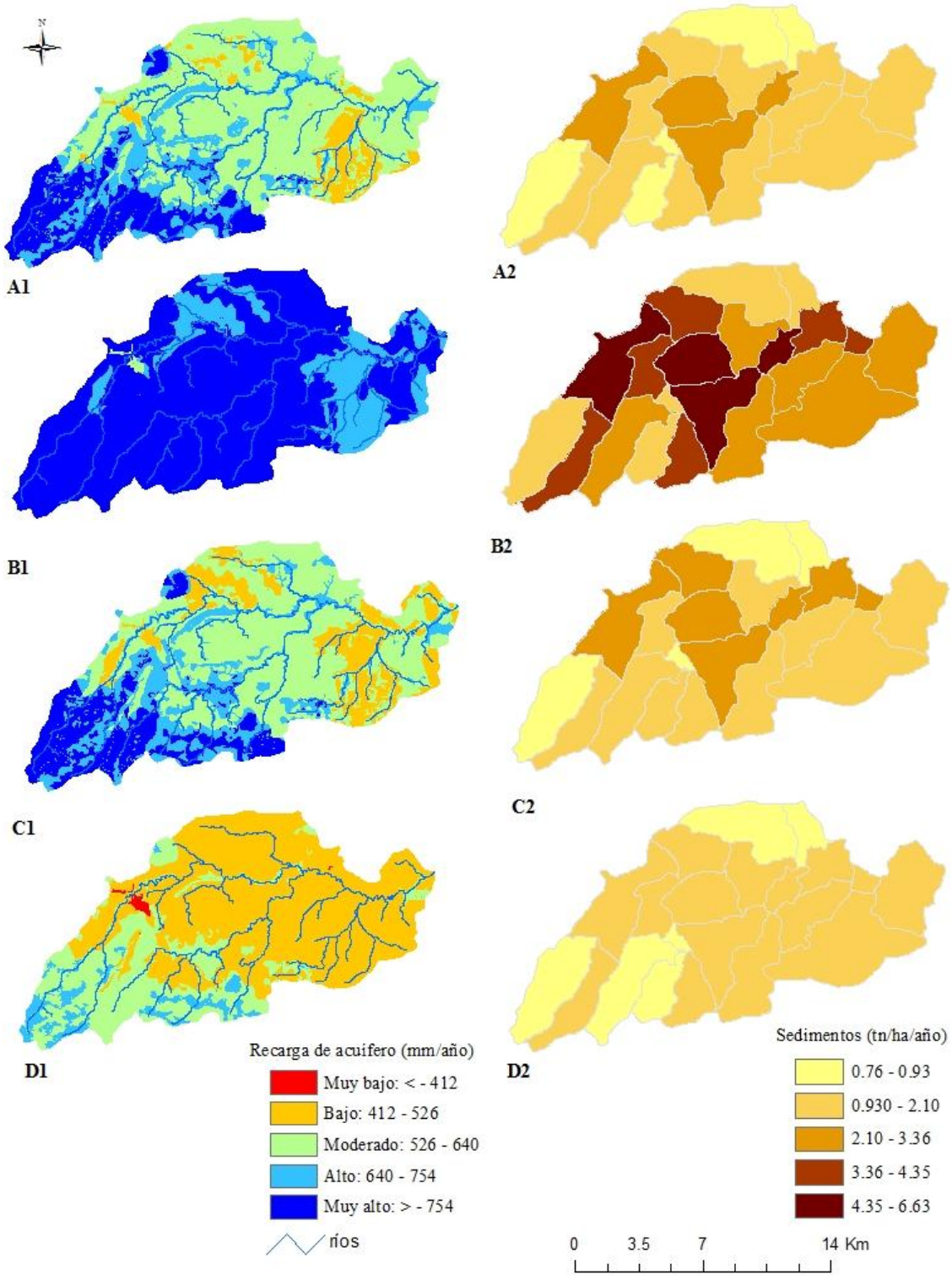

Figura 17. Promedio anual de recarga de acuífero y producción de sedimentos (A1,A2) 2030, (B1, B2) GFDLR30, (C1,C2) ECHAM4, (D1,D2) HADCM3

4.5.5 Impactos del cambio climático y ZEE en la disponibilidad y demanda futura del agua

Se utilizó los resultados de impactos anuales del cambio climático (CC) en las variables de precipitación y temperatura, debido que no se cuenta con información mensual de los impactos del CC. En la figura 18, los resultados obtenidos con el HADCM3, muestran que el caudal base presenta un déficit en los meses de marzo a abril, con respecto a la demanda futura de agua (Qdemanda). Al contrario, con el modelo GFDLR30, se presentaría una mayor oferta de agua para estos meses críticos. No se analizó el modelo ECHAMA4 debido que presentan una baja variabilidad y se comporta de manera similar al escenario base (2030).

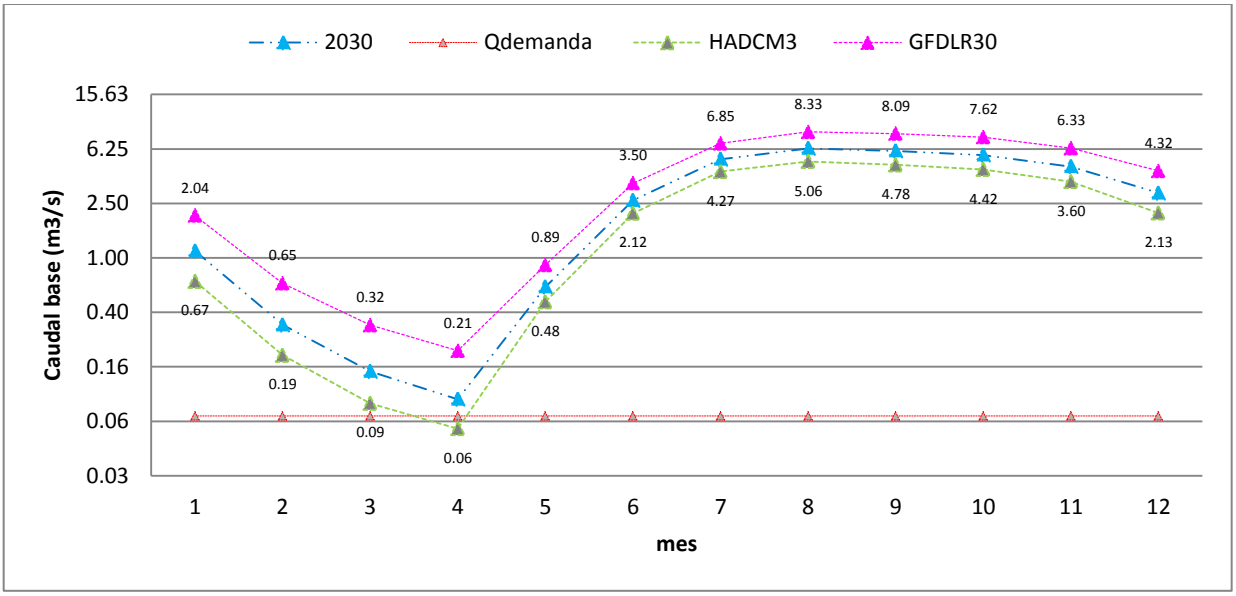

Figura 18. Comportamiento mensual de la disponibilidad de agua con cambio climático

En la figura 19, se muestran los resultados de la aplicación de un supuesto manejo de la cuenca, teniéndose en cuenta los mapas de zonificación ecológica y económica (ZEE). Del mismo modo, el modelo GFDLR30 presenta las mejores condiciones de oferta de agua a diferencia del HADCM3. Por lo tanto, los escenarios con manejo de la cuenca y con el año base (2030), presentan un comportamiento similar a los impactos del cambio climático.

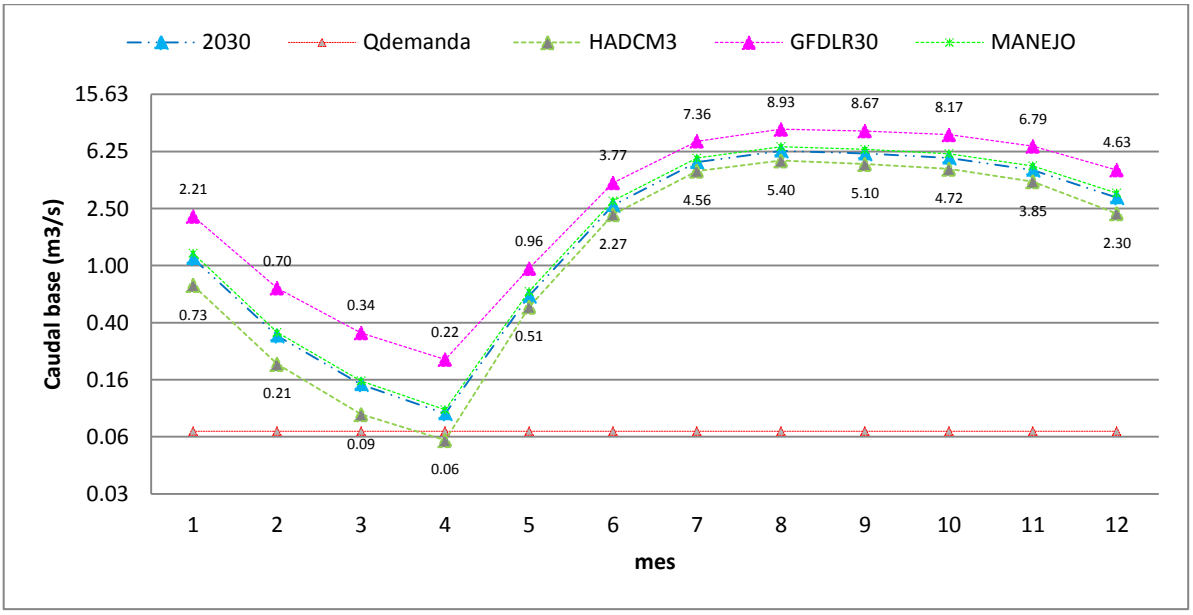

Figura 19. Comportamiento mensual de la disponibilidad de agua con manejo de la cuenca y cambio climático

4.6 Discusión

La reducción de los bosques para la conversión en ganadería y agricultura, han significado impactos negativos en la alteración de los componentes hidrológicos en escenarios de 1980, presentando niveles altos de escorrentía y producción de sedimentos, y bajos niveles de recarga de acuífero. Por lo tanto, el equilibrio en la hidrología de la cuenca hidrográfica esta función de la distribución de la vegetación y su interacción con el agua y el suelo, y su alteración modifica el ciclo hidrológico (Guo *et al.* 2008; Juckem *et al.* 2008; Li *et al.* 2009; Mango *et al.* 2011). Mientras tanto, las comparaciones con el uso de 2010 y 2030, muestran que existe una alta transición de pastos sin árboles para pastos con árboles dispersos, estos cambios teóricamente han mejorado las condiciones hidrológicas. En ese sentido, Wilson y Ludlow (1991) mencionan que los árboles en potreros provocan una disminución en tasas de transpiración y evaporación en los pasturas; además, según (Young 1997) menciona que los árboles evitan el estrés hídrico de los pastos, porque los árboles actúan como barreras que reducen la escorrentía y los impactos de las lluvias y mejora la infiltración y la retención de agua en el suelo. Bajo esos conceptos se caracterizó en la base de SWAT a los pastos sin árboles en una condición hidrológica pobre por la baja cobertura que presentaban en el momento de la evaluación y los pastos con árboles una condición buena.

En cuanto a la escorrentía los cambios de uso del suelo muestran una reducción entre 24 y 30%; en cambio, en la producción de sedimento entre 43 y 47%. En concordancia con Miller *et al*.(2002), la escorrentía está directamente relacionado a la producción de erosión y

sedimentos; también se corrobora con estudios similares pero de sentido contrario, que los cambios bosque a pastizales incrementa entre 11 y 59% (Notter *et al.* 2007). En contraste, estudios similares, mencionan que los bosques que se convierte en pastos, no cambia significativamente el balance hídrico, por lo que su comportamiento hidrológico es similar; Asimismo, estudios realizados por Huang *et al*.(1999) y Li *et al* (2009), afirman que esto va depender de la cobertura de la copa de árboles; si los bosques son menos densos presentaran más escorrentías con los pastos con coberturas muy altas, pero al mismo tiempo puede traer disminución de agua en el suelo por la alta evapotranspiración. Esto se corrobora con lo que mencionan Miller *et al* (2002), que las pasturas avanzados de degradación son factores que aceleran la erosión hídrica y afectan la calidad del agua; de mismo modo Grover y Musick (1990) mencionan que estos factores tienen relación al pastoreo del ganado; asimismo, según Li *et al* (2009), mencionan que la disminución de la erosión va estar en función de la alta densidad de la cubierta forestal o pastizal o las prácticas de conservación.

En la recarga de los acuíferos los resultados mostraron que son más sensibles al cambio de uso del suelo; en concordancia con los trabajos similares realizados por Schmalz y Fohrer (2009). Mientras tanto, la transición a los sistemas de pastos con árboles, también han mostrado las mejores condiciones de recarga de acuífero para el 2010 y 2030, con un incrementó entre 17% y 12% respectivamente. En concordancia con Mango *et al.* (2011), alteraciones en el balance hídrico puede disminuir en 9% de las recargas de acuíferos. Por otro lado, estudios similares señalan que la transformación de bosque a pasturas pueden reducir en el 54% de la recargas del acuífero; sin embargo, las grandes desviaciones estándar en la recarga de acuífero están directamente influenciados a la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica, los que se muestran desviación más elevados de acuerdos a los tipos de suelos (Heuvelmans *et al.* 2005). Por otra parte, los resultados mostraron que los niveles altos de recarga de acuífero se han concentrado en la cuenca alta (figura 13, 15, 17), esto es probable que este influenciados por las características texturales de los suelos (franco arenosa) del tipo Alfisol; además, presentan alta cubierta forestal (bosques densos, café y pasturas) y con pendiente relativamente ondulados. Y los niveles bajos se presentaron en zonas muy bajas con características de suelos arcillosos del tipo Vertisol. En efecto, los factores determinante en la recarga de acuíferos son los factores del clima, uso de suelo, topografía y tipo de suelo, y no pueden generalizarse para otras cuencas (Miller *et al.* 2002; Schmalz y Fohrer 2009); asimismo existe más riesgo si las actividades agrícolas o la disminución de los bosques se concentran en la cuenca alta, lo que conllevaría a la reducción de los acuíferos (Baldyga *et al.* 2004).

En cambio, en la producción de agua los diferentes escenarios no han mostrado cambios resaltantes; pero al contrario, según Bultot *et al.* (1990), mencionan que los caudales de los ríos son sensitivos por el cambio de uso del suelo; pero estudios similares realizados por Mango *et al*.(2011) mencionan que las aguas superficiales presentan variaciones menores en 3% por cambio de uso del suelo.

Con respecto al cambio climático, los resultados mostraron que todos los componentes del balance hídrico fueron más sensibles al cambio climático en comparación con el clima normal; donde la producción de agua, la escorrentía superficial, la recarga de acuíferos y la producción y sedimentos han presentado los valores más altos con respecto al escenario base usando el modelo GFDLR30, y al contrario se presentó con el HADCM3. Por lo tanto, los distintos modelos muestran una gran incertidumbre por las grandes variaciones que existen entre ellos. Según Delworth *et al*.(2002) mencionan que el GFDLR30 presenta variaciones de precipitaciones excesivas para Centroamérica, sur de África, sudeste de Asia, este de Australia y parte de oeste de américa central, para ambas estaciones (invierno y verano). En cambio, el HADCM3, han presentado mejores aciertos del clima comparados con los datos de estación climática en Centroamérica (IMN 2008)

Los modelos ECHAM4 y HADCM3, presentaron reducciones en los valores del balance hidrológico, siendo las baja en este último. Estudios similares realizado por Candela *et al.*(2009) utilizando el modelo HADCM3, determinó que la recarga de los acuíferos con escenarios de clima A2, han experimentado reducciones en 21% de la descarga anual. Esto se asemeja a nuestros resultados utilizando el mismo modelo, pero no podemos generalizarlo debido que las condiciones climáticas, suelos, vegetación pueden ser muy diferentes. No obstante, trabajos realizados por IMN (2008), considera que estos modelos HADCM3 tiene mejor precisión para Centroamérica. En cambio del modelo ECHAM4, fueron los que han presentado las variaciones más modestas en el clima, con alteraciones en un 3% con respecto al clima normal de estación. No obstante, estudios similares señalan que los impactos de cambio climático solo es un cambio en la alteración de una distribución estacional de los caudales que en la cantidad promedio anual (Tu 2009).

Por otra parte, los resultados mostraron que los componente del balance hídrico, presentan impactos porcentuales muy similares con manejo o sin manejo de la cuenca, por lo que las alteraciones de clima influye determinante en el comportamiento hidrológico. Por lo tanto, variaciones solo en el 3% de las precipitaciones puede reducir en 25% en promedio de la descarga media del caudal (Mango *et al.* 2011). No obstante, con el manejo de la cuenca se genera mejores condiciones de adaptación en la disminución de la escorrentía y la erosión; además, incrementa la recarga de los acuíferos (figura 13 y 17). En concordancia, varios estudios señalan que la mejor manera mitigar y adaptarse al cambio climático, es con el manejo y la conservación de los recursos naturales y la planificación del uso del suelo (Guo *et al.* 2008; Juckem *et al.* 2008; Cepal 2011; Lal *et al.* 2011; Mango *et al.* 2011); y la resiliencia de la sociedades estará en función a la reducción de la vulnerabilidad socioeconómica y ambiental (CEPAL 2011); asimismo, los bosques en terrenos onduladas son muy importante porque contribuyen a reducir la escorrentía, mejoran la infiltración del agua en el suelo, y actúan como reservorios en estaciones secas, su contribución al caudal base alcanza entre 4 y 10% (Liu y Huang 2003); Así mismo, la planificación deben analizarse con buenos criterios

para evitar impactos interrelacionados con los cambio de uso (Heuvelmans *et al.* 2005), y tener una posición más estables y con mejores condiciones hidrológicas, y no amenaza la calidad de agua, porque disminuye la erosión y la sedimentación (Miller *et al.* 2002).

En cuanto a los impactos en la disponibilidad y demanda futura del agua, los resultados mostraron que el modelo HADCM3 son los que presentan impactos negativos, y varía significativamente en el comportamiento estacional del caudal base, de modo que se produce una reducción del agua en 36% para estaciones de verano (diciembre a abril), y el 15% en estaciones invierno (mayo a noviembre). Sin embargo, el caudal base (2030) se incrementa en aproximadamente 5% en los meses secos por efecto del manejo de la cuenca. En concordancia con Tu (2009) el cambio climático puede disminuir en 50% de los caudales en estaciones de verano, y al mismo tiempo puede incrementarse en 50% en estaciones de invierno. En contraste con los estudios realizados por CEPAL (2010a) a escalas nacional, menciona que la disponibilidad del agua no presentaran variaciones para el 2030; pero sin embargo en el 2100, podría verse afectado hasta un 63%.

4.7 Conclusiones

La cuenca del río Compasagua ha mejorado históricamente sus condiciones hidrológicas, por la transición de pastos sin árboles a pastos con árboles dispersos, con la disminución de la escorrentía superficial, incrementando los niveles de recarga de acuíferos, y la reducción en la producción de sedimentos.

Los componentes hidrológicos como la escorrentía, recarga de acuíferos y producción del agua son más afectados por el cambio climático que al cambio de uso del suelo, y la alta producción de sedimentos está directamente relacionada a los valores altos de la precipitación y escorrentía superficial.

Los diferentes modelos de proyección climática muestran una gran incertidumbre en la proyección de los cambios del clima y sus impactos en la hidrología, con alteraciones muy significativas en producción agua, los que pueden afectar en el futuro por escases (sequías) con el modelo HADCM3 y con abundancia (inundaciones, erosión) por GFDLR30.

El manejo de la cuenca, ayuda a reducir la producción de sedimentos, y también mejora muy levemente las condiciones hidrológicas para hacer frente a los impactos del cambio climático.

El modelo HADCM3, presenta impactos muy negativos en la reducción de la disponibilidad del agua, y se muestran más afectados en el comportamiento mensual, sobre todo en estaciones más secas (febrero a abril), reduciendo la oferta en aproximadamente 36%

y con problemas de déficit para la demanda futura de agua (2030) tanto en la población y el sector ganadero.

4.8 Recomendaciones

Para estudios posteriores es recomendable contar con mayor información de caudales, muestreos de suelos, pruebas de conductividad hidráulica y varios registros de estaciones climáticas.

Dentro de los planes de manejo (ZEE) es importante incluir las medidas de adaptación con las construcciones de infraestructuras de almacenamiento de agua, las cosechas de agua de lluvia y la intensificación de la ganadería.

Es importante que la ZEE para el ordenamiento territorial debe tener en cuenta los estudios de recarga de acuíferos para que las acciones de intervención en la cuenca no afecte la disponibilidad futura del agua.

Estos datos pueden tomarse como un estudio preliminar, para cualquier propuesta de proyectos de gestión integrada del recurso hídrico.

4.9 Bibliografía

AMUPNOR, (Asociación de Municipios Productivos del Norte). 2010. Diagnóstico del plan de ordenamiento y desarrollo territorial - Muy Muy. 152 p.

Arnold, J; Fohrer, N. 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. Hydrological Processes 19(3):563-572.

Bultot, F; Dupriez, G; Gellens, D. 1990. Simulation of land use changes and impacts on the water balance—a case study for Belgium. Journal of Hydrology 114(3):327-348.

Candela, L; Igel, Wv; Javier Elorza, F; Aronica, G. 2009. Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland (Majorca, Spain). Journal of Hydrology (Amsterdam) 376(3/4):510-527.

CEPAL, (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2010a. La economía del cambio climático en centroamérica: Síntesis 2010. p. 143 p.

_____. 2010b. Nicaragua efectos del cambio climático sobre la agricultura. p. 72 p.

_____. 2011. La economía del cambio climático en centroamérica: Reporte técnico 2011. 419 p.

Delworth, T; Stouffer, R; Dixon, K; Spelman, M; Knutson, T; Broccoli, A; Kushner, P; Wetherald, R. 2002. Review of simulations of climate variability and change with the GFDL R30 coupled climate model. Climate Dynamics 19(7):555-574.

Di Luzio, M; Arnold, JG; Srinivasan, R. 2005. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. Hydrological Processes 19(3):629-650.

FAO, (Food and Agriculture Organization of the United Nations)/Cooperazione italiana/UNEP). 2000. Land cover classificaction and user manual. FAO, Rome.179 p.

Gallego, B. 2002. Estructura y composición de un paisaje fragmentado y su relación con especies arbóreas indicadoras en una zona de de bosque muy húmedo tropical, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Costa Rica, CATIE, Turrialba, CR. 103 p.

Grover, HD; Musick, HB. 1990. Shrubland encroachment in southern New Mexico, USA: an analysis of desertification processes in the American Southwest. Climatic Change 17(2):305-330.

Guo, H; Hu, Q; Jiang, T. 2008. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. Journal of Hydrology (Amsterdam) 355(1/4):106-122.

Heuvelmans, G; Garcia-Qujano, JF; Muys, B; Feyen, J; Coppin, P. 2005. Modelling the water balance with SWAT as part of the land use impact evaluation in a life cycle study of CO2 emission reduction scenarios. Hydrological Processes 19(3):729-748.

Huang, M; Kang, S; Li, Y. 1999. A comparison of hydrological behaviors of forest and grassland watersheds in gully region of the Loess Plateau. Journal of Natural Resources 14(3):226-231.

IMN, (Instituto Meteorológico Nacional). 2008. Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica.Segunda Comunicación Nacional, Comité Regional Nacional de Recursos Hidráulicos. San José, CR p. 72 p.

Juckem, PF; Hunt, RJ; Anderson, MP; Robertson, DM. 2008. Effects of climate and land management change on streamflow in the driftless area of Wisconsin. Journal of Hydrology (Amsterdam) 355(1/4):123-130.

Kalin, L; Hantush, MM. 2006. Hydrologic modeling of an eastern Pennsylvania watershed with NEXRAD and rain gauge data. Journal of Hydrologic Engineering 11:555.

Lal, R; Delgado, J; Groffman, P; Millar, N; Dell, C; Rotz, A. 2011. Management to mitigate and adapt to climate change. Journal of Soil and Water Conservation 66(4):276-285.

Li, Z; Liu, W; Zhang, X; Zheng, F. 2009. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology (Amsterdam) 377(1/2):35-42.

Liu, X; Huang, M. 2003. Hydrologic behaviour and effect of forest on regulation of river runoff in Loess Hilly and Gully Region. Agricultural Research in the Arid Areas 2:016.

Mango, L; Melesse, A; McClain, M; Gann, D; Setegn, S. 2011. Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: results of a modeling study to support better resource management. Hydrol. Earth Syst. Sci 15:2245-2258.

Miller, SN; Kepner, WG; Mehaffey, MH; Hernandez, M; Miller, RC; Goodrich, DC; Devonald, K; Heggem, DT; Miller, WP. 2002. Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 38(4):915-929.

Miller, SN; Semmens, DJ; Goodrich, DC; Hernandez, M; Miller, RC; Kepner, WG; Guertin, DP. 2007. The automated geospatial watershed assessment tool. Environmental Modelling & Software 22(3):365-377.

Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J; Williams, J. 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2005. Texas Water Resources Institute, College Station, Tex:494 p.

Notter, B; MacMillan, L; Viviroli, D; Weingartner, R; Liniger, HP. 2007. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region. Journal of Hydrology (Amsterdam) 343(3/4):266-278.

Schmalz, B; Fohrer, N. 2009. Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model. Advances in Geosciences 21:91-98.

Setegn, SG; Srinivasan, R; Dargahi, B. 2008. Hydrological modelling in the Lake Tana Basin, ethiopia using SWAT model. Open Hydrology Journal 2:49-62.

Tu, J. 2009. Combined impact of climate and land use changes on streamflow and water quality in eastern Massachusetts, USA. Journal of Hydrology (Amsterdam) 379(3/4):268-283.

White, KL; Chaubey, I. 2005. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 41(5):1077-1089.

Wilson, J; Ludlow, M. 1991. The environment and potential growth of herbage under plantations. Forages for plantation crops. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research:10-24.

Williams, JR. 1995. The EPIC model. Computer models of watershed hydrology. In: V.P Singh (eds):909-1000.

Wischmeir, WH; Smith, DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Agriculture Handbook 282:69.

Young, A. 1997. Agroforestry for soil management. Cab International. v. Ed. 2,