



“Por un Desarrollo Agrario
Integral y Sostenible”

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE

Trabajo de Graduación

**Impacto del Cambio Climático en el comportamiento
hidrológico de las cuencas hidrográficas, aplicando el
modelo SWAT en Nicaragua.**

AUTORA

Br. Mariann José Espinoza Acuña

ASESORES

Dra. Martha Orozco Izaguirre

Dr. Carlos Ramón Zelaya Martínez

Septiembre, 2017

Managua, Nicaragua.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE ANEXOS	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
SIGLAS	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1. General	3
2.2. Específicos	3
III. MATERIALES Y MÉTODOS	4
3.1. Área de estudio	4
3.2. Metodología	7
3.2.1. Modelo Hidrológico	7
3.2.2. Escenario Climático	8
3.3. Etapas Metodológicas	9
3.3.1. Etapa I: Recolección de la información	9
3.3.2. Etapa II: Reclasificación y Estructuración de la información	10
3.3.3. Etapa III: Análisis de la información	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
4.1. Escenario del Cambio Climático	22
4.2. Descripción biofísica de las cuencas hidrográficas	26
4.2.1. Reclasificación de la información utilizada	26

4.2.2.	Cuenca del Río Coco	29
4.2.3.	Cuenca de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte.....	35
4.2.4.	Cuenca del Río Grande de Matagalpa	39
4.2.5.	Cuenca de la Región Autónoma de la Costa Caribe Sur	44
4.2.6.	Cuenca del Río San Juan	47
4.2.7.	Cuenca del Pacífico	53
4.3.	Impactos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos.....	58
4.3.1.	Influencia en el escurrimiento superficial.....	60
4.3.2.	Influencia en la carga de sedimentos	63
4.3.3.	Prioridad de manejo de las unidades hidrográficas deficitarias.....	66
V.	CONCLUSIONES.....	68
VI.	RECOMENDACIONES	69
VII.	LITERATURA CITADA	71
VIII.	ANEXOS	73

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Sendas Representativas de Concentración según el informe del IPCC.....	8
Cuadro 2. Número de unidades hidrográficas por nivel según la metodología Pfafstetter.	11
Cuadro 3. Clases de cobertura forestal de Nicaragua según INAFOR.....	13
Cuadro 4. Subórdenes de suelos según INETER	14
Cuadro 5. Clases de pendientes definidas para la modelación.	19
Cuadro 6. Clasificación de la erosión hídrica.....	20
Cuadro 7. Clasificación del grado de prioridad de manejo de las UHs.....	21
Cuadro 8. Reclasificación de los mapas de cobertura forestal de Nicaragua según SWAT.	26
Cuadro 9. Reclasificación de los subórdenes de suelos de Nicaragua a partir de la Clasificación Mundial de Suelos de FAO	27
Cuadro 10. Distribución de las pendientes en las CH de Nicaragua	28
Cuadro 11. Unidades hidrográficas modeladas con SWAT.....	29
Cuadro 12. Subórdenes de suelos presentes en las nueve UHs del Río Coco.....	30
Cuadro 13. Cambios en el uso de la tierra en las nueve UHs del Río Coco. Años 2000, 2015 y 2050 con recomendaciones.....	32
Cuadro 14. Cambios en las HRUD de las subunidades del Río Coco.....	33
Cuadro 15. Subórdenes de suelos presentes en las nueve UHs de la RACCN.....	35
Cuadro 16. Cambios en el uso de la tierra en las nueve UHs de la RACCN. Años 2000 y 2015.	36
Cuadro 17. Cambios de HRUD de subunidades de la RACCN	37
Cuadro 18. Subórdenes de suelos presentes en las nueve UHs del Río Grande de Matagalpa.	40
Cuadro 19. Cambios en el uso de la tierra en las nueve UHs del Río Grande de Matagalpa. Años 2000, 2015 y 2050 con recomendaciones.....	41
Cuadro 20. Cambios en las HRUD de las subunidades del Río Grande de Matagalpa.....	42
Cuadro 21. Subórdenes de suelos presentes en la nueve UHs de la RACCS.....	45
Cuadro 22. Cambios en el uso de la tierra en las nueve UHs de la RACCS. Años 2000 y 2015.	45
Cuadro 23. Cambios en las HRUD de las subunidades de la RACCS.....	46
Cuadro 24. Subórdenes de suelos presentes en las 27 UHs del Río San Juan.....	49

Cuadro 25. Cambios en el uso de la tierra en las 27 UHs deficitarias en la cuenca Río San Juan. Años 2000, 2015 y 2050 con Recomendaciones.....	50
Cuadro 26. Cambios en las HRUD de las subunidades del Río San Juan	51
Cuadro 27. Subórdenes de suelos presentes en las tres UHs del Pacífico	54
Cuadro 28. Cambios en el uso de la tierra en las tres UHs del Pacífico. Años 2000, 2015, y 2050 con recomendaciones.	55
Cuadro 29. Cambios de HRUD de las subunidades del Pacífico.....	56
Cuadro 30. Unidades hidrográficas deficitarias de Nicaragua según su precipitación y evapotranspiración.	58
Cuadro 31. Escurrimiento superficial en las unidades hidrográficas deficitarias de Nicaragua	60
Cuadro 32. Carga de sedimentos en las unidades hidrográficas deficitarias de Nicaragua	63
Cuadro 33. Prioridad de manejo de las unidades hidrográficas deficitarias	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación climática de Nicaragua según Köppen.....	6
Figura 2. Información base para la aplicación del modelo SWAT.	9
Figura 3. Unidades hidrográficas de Nicaragua según la metodología Pfafstetter.....	12
Figura 4. Mapa de la red meteorológica principal de Nicaragua.....	14
Figura 5. Ecuación exponencial de la presión de vapor saturado del agua.	16
Figura 6. Variación de la precipitación anual de datos histórico vs año 2050 RCP 8.5.....	22
Figura 7. Variación de la precipitación anual en las unidades hidrográficas de Nicaragua según SWAT.....	23
Figura 8. Variación de la temperatura media de datos históricos vs Año 2050 RCP 8.5.....	24
Figura 9. Variación de la temperatura máxima de datos histórico vs. Año 2050 RCP 8.5.	25
Figura 10. Variación de la temperatura mínima de datos históricos vs. Año 2050 RCP 8.5. ...	25
Figura 11. Distribución de las pendientes en las tres UHs que aportan al caudal al Rio Coco.	29
Figura 12. Distribución de las pendientes en las seis UHs deficitarias del Rio Coco.....	30
Figura 13. Unidades de respuesta hidrológica dominante de las nueve unidades hidrográficas del Río Coco.	34
Figura 14. Distribución de las pendientes de las nueve UHs que aportan en la RACCN.	35
Figura 15. Unidades de respuesta hidrológica dominante de las nueve unidades hidrográficas de la RACCN.....	38
Figura 16. Distribución de las pendientes en las tres UHs que aportan del Rio Grande de Matagalpa	39
Figura 17. Distribución de las pendientes en las seis UHs deficitarias del Rio Grande de Matagalpa	39
Figura 18. Unidades de respuesta hidrológica dominante de las nueve unidades hidrográficas del Río Grande de Matagalpa	43
Figura 19. Distribución de las pendientes en las nueve UHs de la RACCS.	44
Figura 20. Unidades de respuesta hidrológica dominante de las nueve unidades hidrográficas de la RACCS.	47
Figura 21. Distribución de las pendientes en las 13 UHs que aportan al Rio San Juan.	48

Figura 22. Distribución de las pendientes en las 14 UHs deficitarias del Río San Juan.....	48
Figura 23. Unidades de respuesta hidrológica de las 27 unidades hidrográficas del Río San Juan.	52
Figura 24. Distribución de las pendientes de las tres UHs deficitarias del Pacífico.	53
Figura 25. Unidades de respuesta hidrológica dominante de las tres unidades hidrográficas del Pacífico.....	57
Figura 26. Aporte de agua al caudal de las unidades hidrográficas de Nicaragua	59
Figura 27. Influencia del cambio climático en el escurrimiento superficial en las unidades hidrográficas de Nicaragua.....	62
Figura 28. Cambios en las pérdidas de suelos de las unidades hidrográficas deficitarias. Año 2015, 2050 y 2050 con recomendaciones	64
Figura 29. Influencia del cambio climático en la carga de sedimentos en las unidades hidrográficas de Nicaragua.....	65

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Comportamiento del clima histórico (1970-2007) vs clima futuro en las estaciones seleccionadas	73
Anexo 2. Comportamiento del clima histórico (1970-2007) vs clima futuro en las estaciones seleccionadas	74
Anexo 3. Comportamiento del clima histórico (1970-2007) vs clima futuro en las estaciones seleccionadas	75

DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

A aquella mujer luchadora, que se esforzó para forjarme como persona, que me enseñó a aprender de mis errores y que siempre brindó de su abrigo en cada tropiezo que daba, mi madre Aura Lila Acuña Espinoza.

A aquel hombre trabajador de carácter fuerte pero amoroso y protector, que luchó arduamente para brindar, a mis hermanos, hermanas, y a mí, la mejor educación, mi padre Humberto José Espinoza Rivas.

A aquellos primeros amigo(as), que a pesar de las circunstancias siempre están presentes para brindar su apoyo fraternal, a mis hermanos, hermanas y familiares.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera muy especial:

A las autoridades académicas y a todos aquellos docentes que contribuyeron a mi formación profesional, que con sus conocimientos me permitieron llegar hasta donde actualmente estoy.

A mis asesores Dr. Martha Orozco Izaguirre y Dr. Carlos Zelaya Martínez, por apoyarme y confiar en mí para el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos y colegas, Nadieska Sánchez, Jorge Jirón, Haydes Triguero e Ixpayacat Bustillo, por todos esos desvelos con un sueño en conjunto. A Darinka Zeledón, Marcio Berrios y Daniel Tijerino por su colaboración en aquellos pequeños pegones que surgieron durante la investigación.

A los profesores de la Universidad de Texas A&M, Dr. Raghavan Srinivasan y Dr. Charles Allan Jones, por su disposición ante algunas dudas surgidas en cuanto al manejo del modelo hidrológico SWAT.

A todas aquellas personas que de manera directa o indirectamente colaboraron con la realización de este trabajo.

RESUMEN

Los recursos hídricos son los más sensibles ante los efectos del Cambio Climático, por lo que la valoración de su estado resulta indispensable para el bienestar de las comunidades rurales. Por ello, a través de este estudio se estimó el escurrimiento superficial y la carga de sedimentos de las cuencas hidrográficas de Nicaragua mediante el modelo hidrológico SWAT, con el objetivo de generar información del estado de dichos recursos para el diseño de Planes de Manejo Integrado de Cuencas. El análisis se efectuó en tres momentos, utilizando el uso de la tierra del año 2015 en los períodos 1988-2017; y 2040-2069 (año 2050) con el escenario climático pesimista (RCP 8.5); y una proyección de uso de la tierra del año 2015 en donde se propuso los Sistemas Agroforestales en áreas con pasturas y cultivo anual en pendientes mayores del 15%. En total se simularon 66 Unidades Hidrográficas (UH), de las cuales 29 presentaron una respuesta hidrológica deficitaria para el año 2015, y 20 para el año 2050, esta tendencia de disminución fue influenciada por la variación climática proyectada con el escenario climático pesimista. Se obtuvo que para el año 2015 el escurrimiento varió de 65.5 a 497.9 mm y para el 2050 variará de 70.76 a 689.76 mm; en cuanto a la carga de sedimentos, en el año 2015 se registraron tasas de 12.5 a 151.56 ton/ha y para el 2050 de 19.85 a 225.19 ton/ha. Con la propuesta de uso de la tierra se espera que la esorrentía varíe de 36.57 a 683.9 mm y la carga de sedimentos de 0.41 a 121.01 ton/ha, reflejando una disminución media de 70.27 mm y 21.12 ton/ha respectivamente. A partir de estas variaciones se concluyó que las UH de mayor prioridad a ser manejadas son las que se encuentran ubicadas en el corredor seco.

ABSTRACT

Water resources are the most sensitive to climate change's effects, so their assessment is essential to ensure the well-being of rural communities. Therefore, through this study, surface runoff and sediment load of the Nicaragua's watersheds were estimated through the hydrological model SWAT, with the objective of generating information about the condition of these resources for the design of Integrated Watershed Management Plans. The analysis was carried out in three moments, using the land use of year 2015 in the periods 1988-2017, and 2040-2069 (year 2050) with the pessimistic climate scenario (RCP 8.5); and a projection of land use of year 2015 where the agroforestry systems were proposed in areas with pastures and annual cultivation in slopes higher than 15%. 66 Hydrographic Units (UH) were simulated, of which 29 presented a hydrological deficit to year 2015 and 20 to year 2050; this trend of decline was influenced by the projected climatic variation with the pessimistic scenario. Runoff varied from 65.5 to 497.9 mm to 2015, and it will vary from 70.76 to 689.76 mm. In terms of sediment load, in year 2015, were registered loads from 12.5 to 151.56 t/ha and from 19.85 to 225.19 t/ha to year 2050. With the proposed land use, the runoff is expected to vary from 36.57 to 683.9 mm and the sediments loads from 0.41 to 121.01 t/ha, reflecting an average decrease of 70.27 mm and 21.12 t/ha, respectively. From these variations it was concluded that the highest priority UH to be managed are those located in the dry corridor.

SIGLAS

CCAFS	Programa del Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria
CGIAR	Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional
CH	Cuenca Hidrográfica
CHG	Grupo de Riesgos Climáticos
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura
HRU	Unidad de Respuesta Hidrológica
HRUD	Unidad de Respuesta Hidrológica Dominante
INAFOR	Instituto Nacional Forestal
INETER	Instituto Nacional de Estudios Territoriales
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
RCP	Sendas Representativas de Concentración
SAF	Sistema Agroforestal
SWAT	Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua
UH	Unidad Hidrográfica
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
ANA	Autoridad Nacional del Agua
UNI	Universidad Nacional de Ingeniería
GIZ-PROATAS	Agencia Alemana de cooperación Internacional – Programa de Asistencia Técnica en Agua y Saneamiento
SINIA-MARENA	Sistema Nacional de Información Ambiental – Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales.

I. INTRODUCCIÓN

En la última década, Nicaragua se ha encontrado sometida a un sinnúmero de problemáticas a causa de los efectos del Cambio Climático, afectando de manera contundente los diversos sectores productivos de nuestro país, principalmente los que están asociados a la actividad agrícola, pecuaria y forestal.

Es un hecho que el cambio climático, la variabilidad climática y la influencia antropogénica han influido de manera trascendental en el estado actual de los recursos naturales, siendo el recurso hídrico el más afectado. En el informe de Aguas y Cambio Climático en las Américas (2011) se afirma que “ningún recurso es más integral para la salud, bienestar y prosperidad de las comunidades humanas que el agua” y que este es “el medio por el cual el cambio climático impacta a la seguridad alimentaria, la salud, la generación energética, la planificación del desarrollo y la protección de los ecosistemas y de la biodiversidad.” (p. 1)

En Nicaragua los recursos hídricos tienen como principales fuerzas motrices de presión la deforestación (75 mil ha/año), prácticas agropecuarias con alto uso de plaguicidas y prácticas de quema para preparación de la tierra, el aumento de la población y distribución de forma desordenada en el país, ubicación de urbanizaciones sin tomar en cuenta las fuentes hídricas y la deficiencia en la infraestructura sanitaria (alcantarillado y tratamiento de aguas residuales). Estas presiones han ocasionado la disminución de la recarga de los acuíferos y sus afectaciones en su calidad, contaminación de las aguas superficiales por procesos de erosión aumentando la eutrofización y altísimos costos de los sistemas de tratamiento y restauración de ecosistemas acuáticos. (SINIA-MARENA, 2010, p. 154)

Según el reporte de Aguas y Cambio Climático de las Américas (2012, p. 2) los impactos del cambio climático aún son inciertos, por lo que enfocarse en la mejora de los sistemas de monitoreo hidrometeorológicos resulta fundamental; así como la aplicación de métodos para la evaluación de la vulnerabilidad en los diferentes sectores socioeconómicos y sistemas ecológicos.

“Un clima variable y cambiante, en donde existen incertidumbres con respecto a las condiciones extremas futuras, requiere de mayor cantidad, calidad y accesibilidad de la información que apoye el proceso de planeación y toma de decisiones” (Agua y Cambio Climático de las Américas, 2012, p. 6). El monitoreo de las variables climáticas en el tiempo es el punto de partida para el estudio del comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas a través de modelos hidrológicos como lo es Soil and Water Assessment Tool (SWAT), los cuales brindan las pautas para la formulación de estrategias de adaptación al cambio climático, en pro a alcanzar la sostenibilidad económica, ambiental y social.

SWAT permite cuantificar el impacto de las prácticas de manejo de la tierra sobre el agua, la generación de sedimentos y los rendimientos químicos agrícolas en cuencas grandes con características de suelos, condiciones de uso y manejo de la tierra variables durante largos períodos de tiempo. Resulta en una herramienta importante para representar los componentes individuales que afectan en los procesos erosivos y estimar las cargas de sedimentos y el aporte de agua a la red de drenaje y al acuífero.

Por ello la aplicación de este modelo hidrológico permite conocer el comportamiento hidrológico de las cuencas y a partir de este identificar las unidades hidrográficas que requieren prioridad en el diseño de planes de Gestión Integrado de Cuencas con la finalidad de fortalecer la resiliencia de las comunidades rurales y contribuir en la restauración y/o conservación de los recursos naturales.

II. OBJETIVOS

2.1. General

- ❖ Contribuir con información actualizada que permita modelar el comportamiento de los recursos hídricos, para el diseño de planes de manejo en las cuencas hidrográficas en Nicaragua, para mejorar la resiliencia ante el Cambio Climático.

2.2. Específicos

- ❖ Determinar la respuesta hidrológica de las unidades hidrográficas de Nicaragua, mediante el análisis de sus características climáticas, edáficas, topográficas y su cobertura vegetal.
- ❖ Identificar las cuencas deficitarias, evaluando escenarios de clima actual y futuro para establecer el orden de prioridad para el diseño de Planes de Gestión Integrado de Cuencas.
- ❖ Definir los tipos de usos de la tierra que contribuyen a la resiliencia de los recursos hídricos mediante la modelación con distintos escenarios climáticos entre las condiciones particulares que presentan las cuencas deficitarias.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

La aplicación del modelo hidrológico se realizó en todo el territorio nacional, utilizando para ello la información generada por las instituciones gubernamentales como INETER e INAFOR, e información global en línea generada por centros de investigaciones e instituciones como CIAT, FAO y CHG.

Según Incer (2014), Nicaragua es un país tropical por encontrarse situado entre el círculo del Ecuador y el Trópico de Cáncer en el hemisferio Norte del planeta, exactamente entre los 11° y 15° de latitud, y en el Hemisferio Occidental entre los 83° y 88° de longitud. (p.12).

Nicaragua se encuentra la mayor parte del año bajo la influencia de los vientos Alisios, provenientes de los anticiclones subtropicales de las Azores y Bermudas. Estos vientos son constantes, de poca variabilidad y tienen la particularidad de arrastrar masas de aire húmedo del mar Caribe hacia el interior de Nicaragua. Este viento cálido y húmedo penetra por la vertiente del Atlántico hacia la vertiente del Pacífico, ejerciendo un efecto importante sobre el estado del tiempo y el clima del país. (INETER, s.f.)

INETER (2005), elaboró un mapa de las zonas climáticas de Nicaragua según la clasificación de Köppen (ver Figura 1.), siendo estas:

- **Clima Caliente y Sub-Húmedo con Lluvia en Verano; AW (AW o, AW1, AW2).** Este clima predomina en toda la Región del Pacífico y en la mayor parte de la Región Norte. Se caracteriza por presentar una estación seca (Noviembre– Abril) y otra lluviosa (Mayo – Octubre). La precipitación varía desde un mínimo de 600 mm en los Valles Intramontanos de la Región Norte, hasta un máximo de 2000 mm al Este del Municipio de Chinandega y en el Municipio de Tuma – La Dalia. La temperatura media anual registra valores de 30°C en la parte central de Región del Pacífico y de 18°C en los lugares elevados del macizo montañoso central.

- **El Clima Monzónico; Am**, predomina en la llanura de las Regiones Autónomas del Atlántico, abarcando el Este del Municipio de Boca de Sábalo y extendiéndose a los Municipios de Tuma – La Dalia , Bonanza y Cabo Gracias a Dios, luego bordea toda la faja costera al Mar Caribe hasta el Municipio de Bluefields. Un pequeño núcleo se presenta al Sur del Lago de Nicaragua. Se caracteriza por registrar un período lluvioso de 9 ó 10 meses, con precipitaciones promedios anuales de 2000 mm a 4000 mm. Las lluvias disminuyen en los meses de Marzo y Abril. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 25°C y 26°C.
- **Clima Caliente y Húmedo con Lluvia todo el Año; A(f)**, se manifiesta al Sureste de la Región Autónoma del Atlántico Sur y en el Departamento de Río San Juan, desde Punta Mono hasta Greytown, Cabecera Municipal del Municipio de San Juan de Nicaragua. En esta área llueve durante todo el año y registra acumulados anuales de precipitación de 5000 mm a 6000 mm. Las lluvias se reducen en los meses de Marzo y Abril y las temperaturas medias anuales oscilan entre 25°C y 27°C.
- **Clima Seco y Árido; BS 1**, se presenta al Oeste del Municipio de Sébaco y en los Municipios de Totogalpa, Telpaneca y Yalagüina de la Región Norte. Se caracteriza por mostrar una estación seca muy severa, con temperaturas medias anuales que oscilan entre 23°C y 27°C, mientras que la precipitación promedio anual, presenta rangos de 650 mm a 800 mm.
- **Clima Templado Lluvioso; C [(A) Cam y (A) Cbm]**, se localiza en las partes más altas de la Región Norte, en la Cordillera de Dipilto y en el Municipio de San Rafael del Norte en el Departamento de Jinotega. Se caracteriza por mostrar, temperaturas medias anuales del orden de los 18°C, debido a que corresponde a lugares situados arriba de los 1000 metros. Las precipitaciones promedios anuales oscilan entre 1000 mm y 1800 mm.

- Los zonas dominadas por el tipo de clima; $A(x')$ y $S(x')$, presentan temperaturas medias anuales entre los 19°C y 21°C con precipitaciones promedios anuales que oscilan entre 1300 mm y 1600 mm. Son climas que muestran a lo largo del año precipitaciones distribuidas uniformemente. Las áreas con climas; $A(C) W1$ y $A(C) W2$, muestran comportamientos similares en cuanto a la temperatura y la precipitación, se caracterizan por ser zonas de transición hacia otros tipos de climas, presentando temperaturas medias anuales de 20°C a 22°C , con precipitaciones promedios anuales de 1100 mm a 1600 mm.

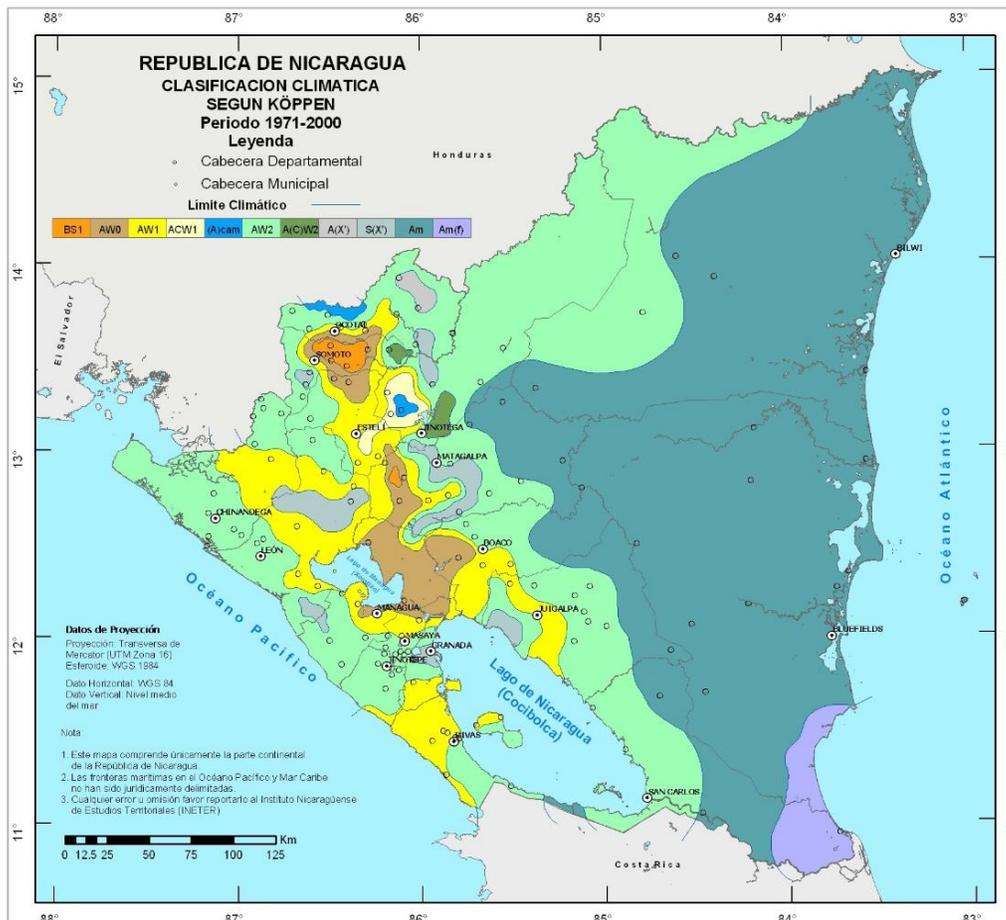


Figura 1. Clasificación climática de Nicaragua según Köppen.

Fuente: INETER, 2005

3.2. Metodología

3.2.1. Modelo Hidrológico

La Herramienta de Evaluación de Suelos y Agua (SWAT) es un modelo de dominio público desarrollado conjuntamente por el servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA-ARS) y Texas A&M AgriLife Research, parte del sistema universitario Texas A&M. Es un modelo semidistribuido, diseñado para simular la calidad y cantidad de agua superficial y subterránea y predecir el impacto ambiental del uso de la tierra, las prácticas de manejo de la tierra y el cambio climático en la producción de sedimentos y la contaminación del agua con agroquímicos.

“SWAT es un modelo completo que requiere una diversidad de información para poder ejecutarse. Muchos de los datos de entradas son usados para simular características especiales que no son comunes para todas las cuencas.” (Arnold et al., 2012, p. 1). El modelo está conformado por un conjunto de submodelos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. El modelo hidrológico está basado en la ecuación general de balance hídrico: (Tapasco et al., 2015, p. 2)

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{qw}}$$

Donde:

SW_t : es el contenido final de agua en el suelo (mm)

SW_0 : es el contenido de agua inicial en el día i (mm) en el tiempo t (día);

R_{day} : es la cantidad de precipitación en el día i (mm);

Q_{surf} : es la escorrentía superficial en el día i (mm);

E_a : es la evapotranspiración en el día i (mm);

W_{seep} : es la cantidad de agua que entra en la zona no saturada del perfil en el suelo en el día i (mm);

Q_{qw} : es la cantidad de flujo de retorno en el día i (mm)

3.2.2. Escenario Climático

Las Sendas Representativas de Concentración (Representative Concentration Pathways: RCP) se identifican por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que varía desde 2,6 a 8,5 W/m² (ver Cuadro 1). Cada RCP tiene asociada una base de datos de alta resolución espacial de emisiones de sustancias contaminantes y concentraciones de gases de efecto invernadero y de usos de suelo hasta el año 2100, basada en una combinación de modelos de distinta complejidad de la química atmosférica y del ciclo del carbono (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015, p. 12).

Cuadro 1. Sendas Representativas de Concentración según el informe del IPCC.

	FR	Tendencia del FR	[CO₂] en 2100
RCP 2,6	2,6 W/m ²	Decreciente en 2100	421 ppm
RCP 4,5	4,5 W/m ²	Estable en 2100	538 ppm
RCP 6,0	6,0 W/m ²	Creciente	670 ppm
RCP 8,5	8,5 W/m ²	Creciente	936 ppm

FR: Forzamiento Radiativo; RCP: Senda Representativa de Concentración

Fuente: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2015, p. 10

Para cada año analizado se asignó un período de 30 años. Estos períodos se designaron de la siguiente manera:

- Período 1, año 2015 (1 de enero del 1988 hasta 30 junio del 2017)
- Período 2, año 2050 (1 de enero del 2040 hasta 31 de diciembre del 2069)

En este estudio, para el período 2 se utilizó el RCP 8.5 categorizado como escenario pesimista, con el propósito de comparar el escurrimiento superficial y la carga de sedimentos en contraste con el registro histórico, para brindar una aproximación de la situación futura de las cuencas de Nicaragua ante variaciones climáticas extremas y uso inadecuado de la tierra.

3.3. Etapas Metodológicas

3.3.1. Etapa I: Recolección de la información

Para lograr la simulación hidrológica de cada una de las unidades hidrográficas de Nicaragua mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT, fue indispensable la recopilación de información geoespacial referente a las elevaciones sobre el nivel del mar, el uso de la tierra, sub-órdenes de suelos y sus respectivas propiedades físico-químicas y, registros climáticos de distintas estaciones meteorológicas ubicadas en el territorio nacional.

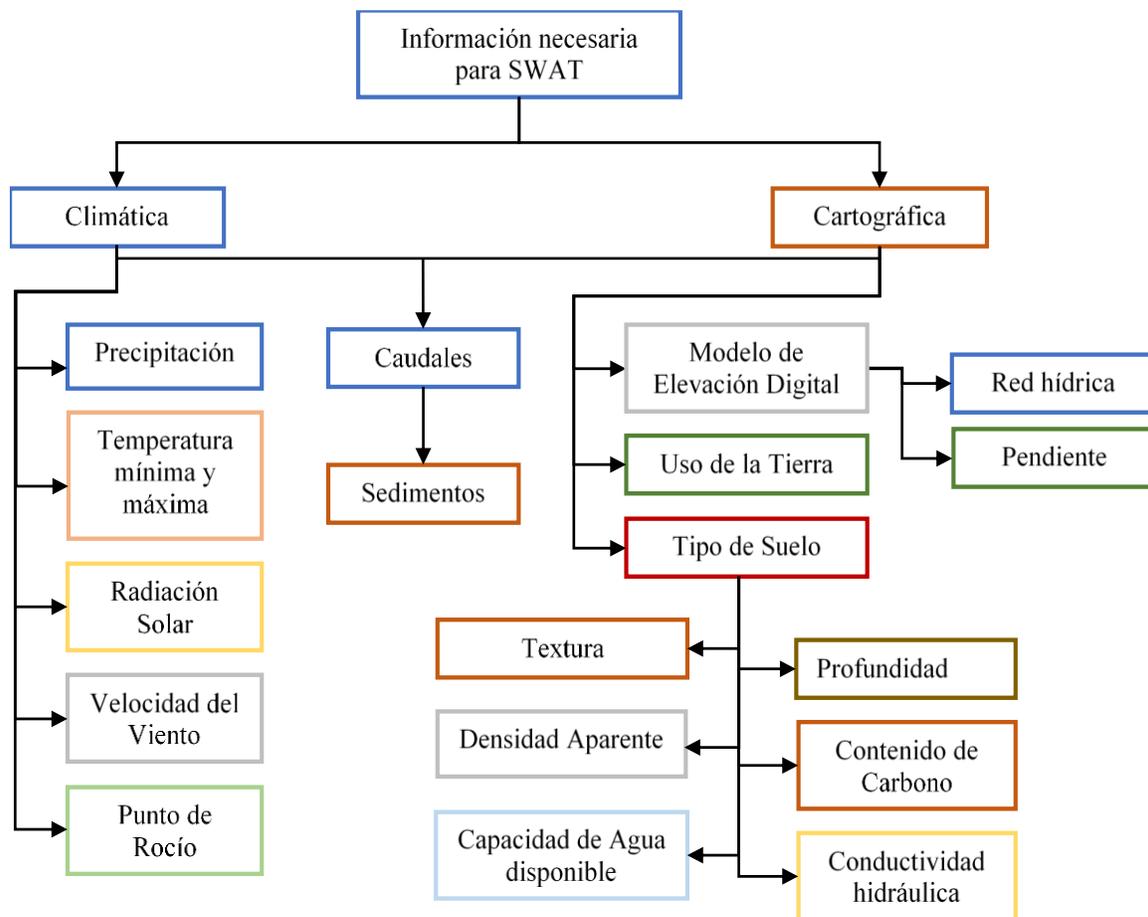


Figura 2. Información base para la aplicación del modelo SWAT.

Fuente: Adaptado de Tapasco et al., 2015

En este sentido, el modelo de elevación digital utilizado fue el generado por el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), obtenido a partir de la página web del U.S. Geological Survey (USGS). Estos datos ofrecen cobertura mundial con una resolución de un arcosegundo (30 metros). A partir de este, el modelo hidrológico define los gradientes de pendientes de las unidades hidrográficas.

Se utilizó tres rasters de Cobertura Forestal de INAFOR, con información de uso de la tierra de los años 2000, 2010 y 2015; con resolución de 30 metros. Asimismo se hizo uso de las bases de datos INETER, la cual consta de dos archivos Shapefile, que contienen la clasificación de los sub-órdenes de suelos según USDA y las cuencas hidrográficas de Nicaragua según la metodología Pfafstetter; y el registro de las 135 estaciones meteorológicas, con información de precipitación diaria para el período 1963-2009. Muchas de estas estaciones carecían de años de registro del período de interés, de modo que sólo se utilizaron 17 estaciones, por ser las que presentaban menos datos faltantes.

3.3.2. Etapa II: Reclasificación y Estructuración de la información

Muchas de las bases de datos obtenidas a través de las instituciones antes mencionadas no se encontraban organizadas de manera que SWAT reconociera la clave designada para el uso de la tierra o tipo de suelo. Por lo que fue necesario el tratamiento de estas bases para efectuar las simulaciones hidrológicas.

De modo que se efectuó una reclasificación y restructuración de las bases de:

1. Cobertura Forestal – Uso de la Tierra del año 2000 y 2015.
2. Sub-órdenes de Suelo – Taxonomía de Suelos USDA.
3. Registro climático de 17 estaciones meteorológicas.

Nomenclatura de cuencas hidrográficas

“El mapa de Cuencas Hidrográficas de Nicaragua de acuerdo con la formación orográfica bien definida del territorio nacional, clasifica al país en seis cuencas hidrográficas” (INETER, ANA, UNI, GIZ-PROATAS, 2014, p. 4) (ver Figura 3.).

A partir de la metodología Pfafstetter (UICN SUR, 2008) se codificaron las unidades de drenaje basado en la topología de la superficie o área del terreno. INETER et al. (2014) delimitó unidades hidrográficas de nivel 4 a 6 para las cuencas del Río Coco, las Regiones Autónomas del Caribe y del Río Grande de Matagalpa; nivel 3 a 6 para la cuenca Río San Juan y, nivel 5 a 8 para la cuenca del Pacífico como se muestra en el cuadro 2. Se presentan las superficies que tiene cada una de las cuencas hidrográficas delimitadas según la metodología Pfafstetter, estas áreas no contemplan las superficies ocupadas por los lagos Xolotlán y Cocibolca.

Cuadro 2. Número de unidades hidrográficas por nivel según la metodología Pfafstetter.

CH	Código	Número de UHs por nivel						Superficie de Nicaragua	
		3	4	5	6	7	8	km ²	%
RC	9516	-	1	9*	64	-	-	18,972.17	15.93
RACCN	9517	-	1	9*	68	-	-	23,879.21	20.05
RGM	9518	-	1	9*	80	-	-	18,856.55	15.83
RACCS	9519	-	1	9*	71	-	-	25,672.62	21.55
RSJ	952	1	5	27*	159	-	-	19,533.46	16.40
PC	9533	-	-	1	3*	13	75	12,191.67	10.24
Total		1	9	64	445	13	75	119,105.68	100.00
Total a modelar		-	-	63	3	-	-	119,105.68	100.00

CH: Cuenca Hidrográfica; UH: Unidad Hidrográfica; RC: Río Coco; RACCN: Región Autónoma de la Costa Caribe Norte; RGM: Río Grande de Matagalpa; RACCS: Región Autónoma de la Costa Caribe Sur; RSJ: Río San Juan; PC: El Pacífico

* Unidades hidrográficas seleccionadas para la simulación hidrológica con SWAT.

Fuente: Adaptado de INETER et al., 2014.

La modelación hidrológica se efectuó en las UHs de nivel 5, a excepción de la cuenca del Pacífico que por representar solo una unidad en dicho nivel, se optó por su análisis en el nivel 6. Esta base de datos no se reestructuró ni se reclasificó como tal, más bien se generó un nuevo archivo Shapefile con las UHs en los niveles seleccionados para el estudio, siendo estas 66 en total.

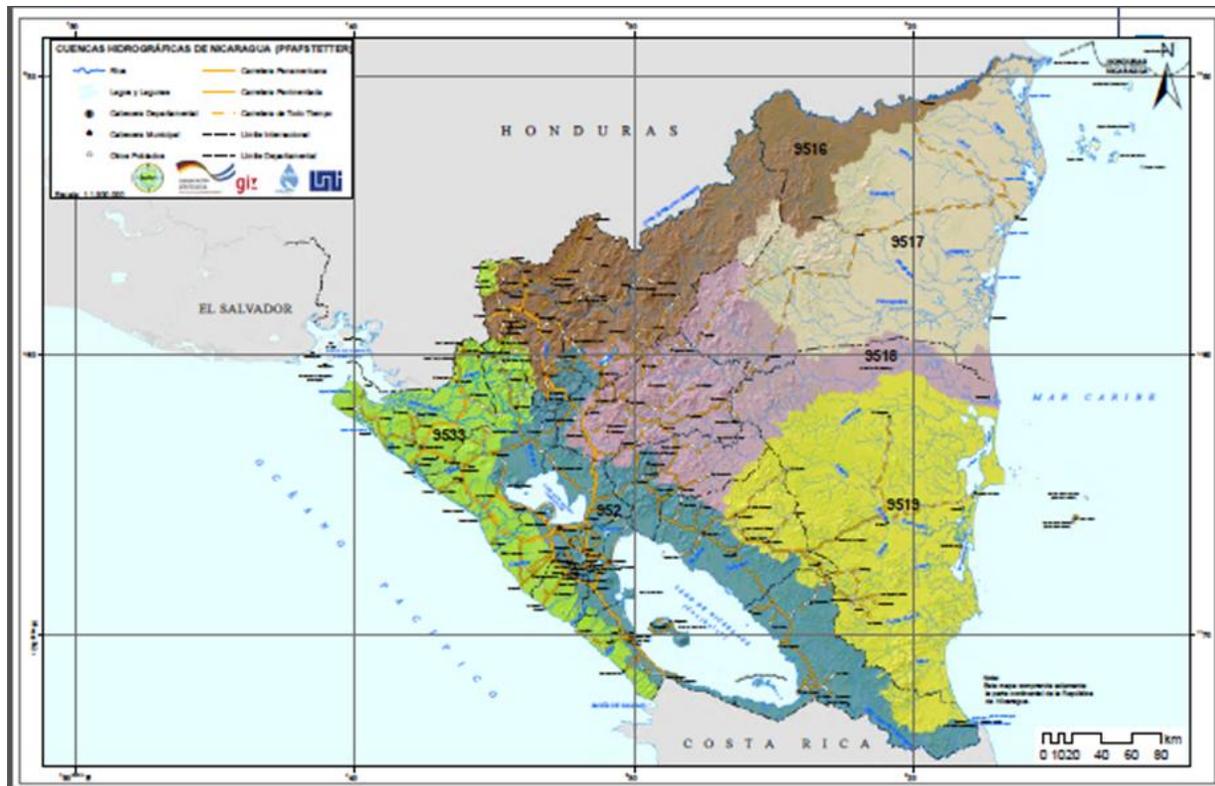


Figura 3. Unidades hidrográficas de Nicaragua según la metodología Pfafstetter.
Fuente: INETER, 2014

Uso de la Tierra

Los mapas de Cobertura forestal de INAFOR requirieron de una reclasificación de los usos descritos en ellos, debido a que SWAT funciona con una base de datos acorde a los usos existentes en los Estados Unidos y exige parámetros muy específicos que son obtenidos a partir de estudios de ecosistemas y de especies. Debido al grado de complejidad de la base de datos, para poder efectuar las simulaciones en las unidades hidrográficas, se decidió seleccionar el uso descrito en el modelo más acorde a las condiciones que presentan los ecosistemas de Nicaragua. (Ver Cuadro 3.)

El año 2015 se presentaba aproximadamente 20,842.55 km² de superficie clasificada como “Otros”, lo que no permitía la simulación en muchas unidades hidrográficas ubicadas principalmente en la RACN y la Región Norcentral, por no contarse con un uso equiparable acorde a SWAT. Por ello se utilizaron los usos de la tierra del año 2010, en sustitución a las áreas definidas como Otros en la cobertura forestal del año 2015.

Cuadro 3. Clases de cobertura forestal de Nicaragua según INAFOR.

Clasificación de los mapas de cobertura forestal de Nicaragua			
Año 2000	Año 2015	Año 2000	Año 2015
Bosque latifoliado denso		Bosque con palma y/o bambú	
Bosque latifoliado ralo		Pastura	Agropecuario
Bosque Secundario		Cultivo	
-	Plantación Forestal	-	Cafetal
Bosque de conífera denso		Sabana	Otros
Bosque de conífera ralo		Matorral	Tacotal
Bosque de mangle		Vegetación arbustiva	
Humedal		Cuerpo de agua	
Vegetación acuática		Sin definir	
Tierra sujeta a inundación	Otros	Lava	Otros
		Urbano	

Sub-órdenes de suelo

SWAT requiere de las propiedades físicas y químicas de los suelos para efectuar las simulaciones. “Las propiedades físicas de los suelos gobiernan el movimiento de agua y el aire a través del perfil y tienen un mayor impacto en el ciclo del agua dentro de las HRU. Las entradas de las características químicas son usadas para establecer los niveles iniciales de las diferencias químicas en los suelos” (Arnold et al., 2012, p. 301).

El mapa de subórdenes de suelos de Nicaragua generado por INETER no contenía información de las propiedades físico-química de estos, lo que dificultaba el análisis. Ante esto se generó un nuevo mapa a partir de la delimitación de INETER y la base de datos Mundial Armonizada de Suelos de la FAO contenida en el software HWSD-viewer (Harmonized World Soil Database v 1.2). Esta fue una herramienta fundamental para la obtención de las propiedades de los suelos por ser la que presenta su base de datos completa y comparable con la Clasificación Taxonómica de Suelos de USDA.

A partir de la base completa se obtuvieron las propiedades importantes para la simulación en SWAT, tales como: profundidad máxima de las raíces en el perfil (mm), profundidad del suelo (mm), densidad aparente húmedo (Mg/m^3 o g/cm^3), capacidad de agua disponible en el horizonte de suelo (mm/mm), contenido de carbono orgánico, arcilla, limo, arena y fragmentos rocosos, factor de erodabilidad (K), pH, entre otros.

Cuadro 4. Subórdenes de suelos según INETER

Suelos de Nicaragua según la Taxonomía de Suelos (USDA)					
Orden	Sub-orden	Orden	Sub-orden	Orden	Sub-orden
Alfisol	Aqualfs	Histosol	Hemists	Entisol	Aquepts
	Udalfs		Aquolls		Fluvents
	Ustalfs		Udolls		Orthents
Andisol	Ustands	Ultisol	Ustolls	Oxisol	Psamments
	Vitrands		Aquults		Perox
Inceptisol	Aquepts		Humults		
	Udepts	Udults			
	Ustepts	Ustults			

Registro climático

La información climática que requiere SWAT se divide en dos partes. La primera corresponde a la base de datos necesaria para el uso del generador climático, y la otra para la simulación con los escenarios climáticos. El generador de clima, estima la precipitación, temperatura, radiación solar y velocidad del viento de una cuenca según la ubicación de las estaciones climáticas más cercanas a esta.



Por ello, se seleccionaron las estaciones que por su ubicación geográfica fuesen representativas para todas las cuencas de Nicaragua y que tuviesen la menor cantidad de datos faltantes en los períodos de análisis (ver Figura 4.).

Figura 4. Mapa de la red meteorológica principal de Nicaragua. Fuente: INETER, s.f

- *Estimación de variables climáticas*

La base de datos para el generador climático requirió del cálculo de los parámetros estadísticos de las variables climáticas de las 17 estaciones meteorológicas seleccionadas. Estos parámetros fueron: la media y desviación estándar de la temperatura máxima y mínima diaria (°C), y de la precipitación diaria (mm/día); media de los números de días con precipitación en un mes; precipitación máxima en el registro por mes (mm); media de la radiación solar diaria (MJ/m²/día), de la temperatura diaria en punto de rocío (°C) y de la velocidad diaria del viento (m/s); entre otros.

WorldClim v2. es una base de datos en línea que brinda datos promedios mensuales de variables climáticas como precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y presión del vapor de agua, del período 1970-2000. Estas variables pueden ser descargadas en archivos GeoTiff (.tif) mensuales con resoluciones de 30 segundos (1 km²) hasta 10 minutos (340 km²). A través de WorldClim, se obtuvieron las variables faltantes en las estaciones meteorológicas de Nicaragua, siendo la radiación solar, velocidad del viento y punto de rocío, a una resolución de un kilómetro cuadrado.

La velocidad del viento y la radiación solar se tomó del valor del pixel del archivo GeoTiff en la que se encontrase ubicada la estación meteorológica para cada uno de los meses del año. En cuanto a la temperatura a punto de rocío, este fue calculado a través de datos de presión de vapor de agua de WorldClim, lo que también requirió conocer la presión de vapor de agua saturada para cada mes, para poder ser estimada mediante la siguiente fórmula:

$$T_{pr} = T + 35 \log \left(\frac{e}{E} \right)$$

Donde:

T_{pr} = Temperatura a punto de rocío (°C)

T = Temperatura media (°C)

e = Presión de vapor de agua

E = Presión de vapor saturado de agua

Para estimar la temperatura a punto de rocío, se determinó una línea de tendencia a partir de los datos de presión de vapor saturado de agua en dependencia de la temperatura media (ver Figura 5.), siendo la exponencial la más adecuada al comportamiento de los datos. A través de la ecuación de la línea de tendencia exponencial, se estimó la presión de vapor de agua saturada utilizando las temperaturas medias mensuales de cada estación.

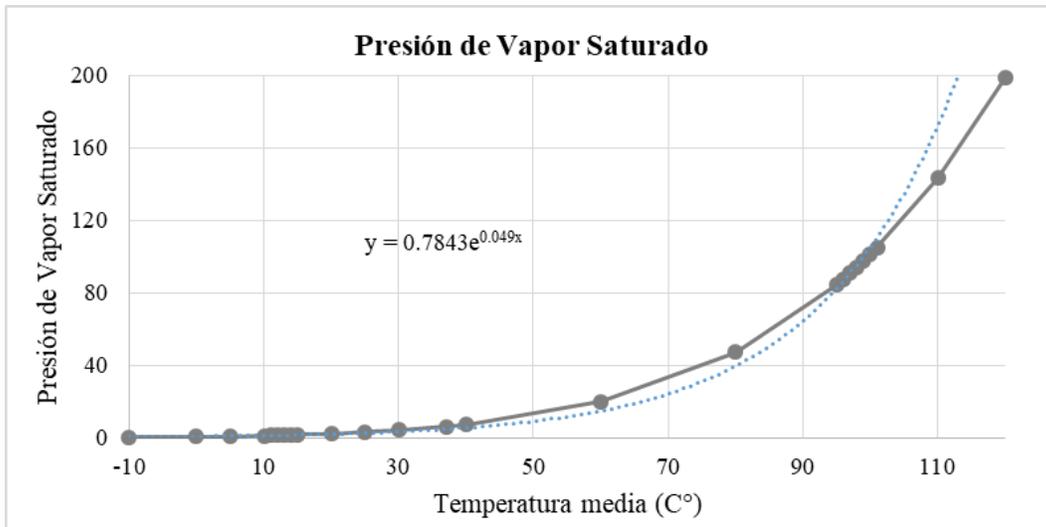


Figura 5. Ecuación exponencial de la presión de vapor saturado del agua.
Fuente: Adaptado de datos climáticos de Olmo y Nave, s.f.

La segunda parte, corresponde a los registros de precipitación y temperaturas máximas y mínimas estructurados por estaciones para los dos períodos a simular. Para cada uno se creó un archivo raíz por variable para el ajuste del generador climático, este contiene el nombre de la estación, las coordenadas geográficas y la altitud sobre el nivel del mar de los mismos.

Los años 1988 hasta 2009 se obtuvieron a partir del registro histórico climático del INETER. Los datos faltantes se calcularon a través del método de proporciones normales, ponderando las precipitaciones de las estaciones índices con las proporciones de la precipitación normal anual de la estación con los datos faltantes, lo que queda expresado en la fórmula siguiente:

$$P_F = \frac{1}{n} \left[\left(\frac{N_X}{N_A} \right) P_A + \left(\frac{N_X}{N_B} \right) P_B + \left(\frac{N_X}{N_C} \right) P_C + \dots + \left(\frac{N_X}{N_n} \right) P_n \right]$$

Donde:

- P_X = es el dato faltante de precipitación que se desea obtener en el período respectivo
- N_X = es la precipitación normal anual de la estación en estudio.
- N_A, N_B, N_C = es la precipitación normal anual de las estaciones índices
- N_n = es la precipitación normal anual de la n -ésima estación índice
- P_A, P_B, P_C = es la precipitación en las estaciones índices durante el mismo período del tiempo del dato faltante
- P_n = es la precipitación en la n -ésima estación índice durante el mismo período del tiempo de dato faltante

Para completar los datos faltantes en los registros diarios de precipitaciones que requiere SWAT, se calculó el promedio trimestral de los años con registros completos.

Las estaciones meteorológicas de los municipios Bluefields, San Carlos y Masatepe, no contenía la información de precipitación diaria de 7 años consecutivos de registro (1989-1995), por lo que con la aplicación del método de proporciones normales, se consideró la estación de Puerto Cabezas como referencia para estimar los datos faltantes para la estación de Bluefields, la estación de Masaya para la de Masatepe y la estación de San Miguelito para completar la de San Carlos.

La estación San Isidro no se tomó en consideración en este análisis por carecer totalmente de información para el período 1988-2017. Sin embargo, se consideró en la base de datos principal, ya que a pesar de no contar con los años de los períodos de interés, contaba con datos muy completos de los años 1960-1980, lo que permitió calcular los parámetros estadísticos necesarios para el generador climático.

Los años carentes en el registro de las estaciones climáticas (2010- junio, 2017), fueron obtenidos a partir de la base de datos mundial CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) el cual facilita datasets cuasi globales de más de 30 años de registros. CHIRPS incorpora imágenes satelitales de resoluciones de $0,05^\circ$ con datos de estaciones in situ para crear series temporales de precipitación en malla.

Para el período 2040-2069, se adquirió la información a través del generador climático en línea MarkSim, desarrollado por CGIAR, CCAFS, CIAT y otros. Este generador facilita información de precipitación, temperatura, velocidad del viento y radiación solar bajo la elección de distintos modelos y escenarios climáticos. En este estudio se utilizó la información climática con el escenario pesimista (RCP 8.5), utilizando 17 modelos climáticos que posee el generador.

3.3.3. Etapa III: Análisis de la información

Para interpretar adecuadamente el comportamiento de los datos de escurrimiento superficial y la cargas de sedimentos obtenidos con SWAT, se efectuó una comparación del registro climático histórico de las 17 estaciones meteorológicas del país y el clima futuro con el escenario pesimista esperado para el año 2050 obtenido mediante MarkSim, con el propósito de evidenciar las variaciones de la precipitación y de la temperatura media, mínima y máxima.

El primer paso para establecer la simulación de una cuenca es la división de la misma en subunidades. Con el modelo hidrológico, a través de ArcSwat, extensión de ArcMap 1.2.2., se delimitaron las 66 Unidades Hidrográficas (UHs) de manera independiente y se definieron las subunidades y la red de drenaje de cada una a partir del modelo de elevación digital (SRTM 30m). Para ello se asignó una distancia de 50 metros desde el límite de las UHs con la herramienta Buffer, con el propósito de garantizar que el parteaguas coincidiera con el de la metodología Pfafstetter. El mapa de cobertura forestal del año 2000 no tiene información del uso de la tierra en la punta de Cosigüina, por lo que este se excluyó del análisis para garantizar la estimación de datos comparables entre los períodos.

Según Arnold et al. (2012, p 2), el área de una subunidad puede ser dividido en Unidades de Respuestas Hidrológicas (HRUs). Las HRU son porciones de una subcuenca que posee atributos únicos de uso y manejo de la tierra, tipo de suelo, y pendiente. Para cada subunidad de las UHs se determinó la Unidad de Respuesta Hidrológica Dominante (HRUD) para los años 2000, 2015 y 2050.

Se analizó el escurrimiento superficial y las cargas de sedimentos para cada Unidad Hidrográfica de Nicaragua. SWAT estima las cargas (sedimentos, nutrientes, etc. transportados por la escorrentía) de cada HRU, las cuales son calculados por separado y luego sumados para determinar las cargas totales de las seis cuencas hidrográficas en estudio.

Para ello se requirió del uso de la cobertura forestal, el tipo de suelo y el modelo de elevación digital. Con este último, se definieron los gradientes de pendientes, los cuales se describen en el Cuadro 5. Para el año 2050, se utilizó la cobertura forestal del año 2015, con una propuesta de cambio de uso de las áreas agropecuaria en pendientes mayores al 15% por Sistemas Agroforestales (SAFs).

Cuadro 5. Clases de pendientes definidas para la modelación.

Rango de la pendiente	Interpretación
0-4%	Plano a ligeramente inclinado
4-8%	Inclinado
8-15%	Fuertemente Inclinado
15-30%	Moderadamente escarpado
>30%	Escarpado a muy escarpado

Fuente: Adaptado de FAO, 2009, p. 12

La modelación de cada UHs se realizó utilizando las bases de datos climáticos estructuradas para los dos períodos correspondientes a los años 2015 y 2050. La información generada por SWAT permitió la obtención de estimaciones de escurrimiento superficial y la carga de sedimentos de las UHs.

A partir del balance hídrico que efectúa SWAT se identificó si la UH aporta agua a los recursos hídricos, considerándose como deficitarias aquellas unidades que presentaron precipitaciones menores a la evapotranspiración potencial ($P-ETP < 0$) es decir que no producen escorrentía superficial que aumente el caudal en los ríos; y UHs que aportan agua a la red hídrica, aquellas que su precipitación anual excede la evapotranspiración potencial ($P-ETP > 0$). Las UHs deficitarias fueron modeladas dos veces para el año 2050 con el escenario pesimista, utilizando diferentes usos de la tierra.

La primera modelación para el año 2050 se realizó con el uso de la tierra del año 2015, con el objetivo de estimar la situación futura de las UHs, si se continúa con ese uso. En la segunda, se efectuó solo en las UHs deficitarias con una propuesta de uso: Sistemas Agroforestales, estos se reclasificaron como bosques mixtos (FRST) según la clasificación utilizada por el modelo hidrológico SWAT.

En el análisis de las cargas de sedimentos se utilizó la clasificación de pérdida de suelos descrita en el Cuadro 6 para facilitar la comparación de los resultados entre los períodos.

Cuadro 6. Clasificación de la erosión hídrica.

Clase de degradación	Pérdida de Suelo (Ton/Ha/Año)
Ligero	< 10
Baja	10-25
Moderada	25-50
Alta	50-100
Muy Alta	>100

Fuente: Perez Gallardo, 2001, p. 67

A partir de esta clasificación, se definió el grado de prioridad de manejo de las UHs deficitarias, según los criterios definidos a continuación (ver Cuadro 6.):

- Si la UHs mantiene su clase de degradación en el año 2015 y 2050, entonces el grado de prioridad será igual a la clase de degradación de la UH. Considerándose a la clase de degradación ligera como prioridad Baja y la clase moderada como prioridad Media.
- Si la UH presenta una clase baja (10-25 ton/ha) en el año 2015 y pasa a ser moderada (25-50 ton/ha) en el año 2050, se considerará como una UH con prioridad Media.
- Si la UH presenta una clase de degradación moderada para el año 2015 y pasa a ser alta (50-100 ton/ha) para el año 2050, se considerará como una UH con prioridad Alta.
- Si la UH presenta una clase de degradación alta para año 2015 y pasa a ser muy alta (>100 ton/ha) para el año 2050, se considerará como una UH con prioridad Muy Alta.

Cuadro 7. Clasificación del grado de prioridad de manejo de las UHs.

Clase de Degradación		Prioridad de manejo de la UH
Año 2015	Año 2050	
Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
Alta	Muy Alta	
Alta	Alta	Alta
Moderada	Alta	
Moderada	Moderada	Media
Baja	Moderada	
Baja	Baja	Baja

Fuente: Elaboración propia a partir de la clasificación de erosión hídrica

En este estudio no se efectuó la calibración de las estimaciones de cargas de sedimentos y escurrimiento superficial debido a la carencia de información referente a los caudales de los ríos de Nicaragua, y por la escala de trabajo que es todo el territorio nacional.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados correspondientes a una comparación del registro climático histórico de las 17 estaciones meteorológicas seleccionadas y el clima esperado para el año 2050 con el escenario pesimista (RCP 8.5). Se presenta también la descripción de las 6 CH, la identificación de las UHs deficitarias y sus Unidades de Respuesta Hidrológica Dominante (HRUD), a partir de las tres modelaciones realizadas en las 66 Unidades Hidrográficas (UHs) de Nicaragua, así como la influencia del cambio climático en el escurrimiento superficial y la carga de sedimentos en las mismas.

4.1. Escenario del Cambio Climático

En la Figura 6 se muestra la variación entre la precipitación media anual del registro histórico de INETER con el clima esperado para el año 2050 (escenario pesimista). Se espera que dentro de 33 años haya una tendencia de disminución de las precipitaciones, siendo las estaciones de Corinto y Chinandega las que presentan las mayores reducciones, de 328 mm y 175 mm, respectivamente. Le siguen las estaciones de León con 81 mm y Condega con 80 mm. Por otra parte, se observan aumentos en algunas de las estaciones meteorológicas, siendo la estación de San Isidro la que presenta el mayor incremento, con 199 mm; seguido de Bluefields con 155 mm; Jinotega con 89 mm y Puerto Cabezas con 42 mm.

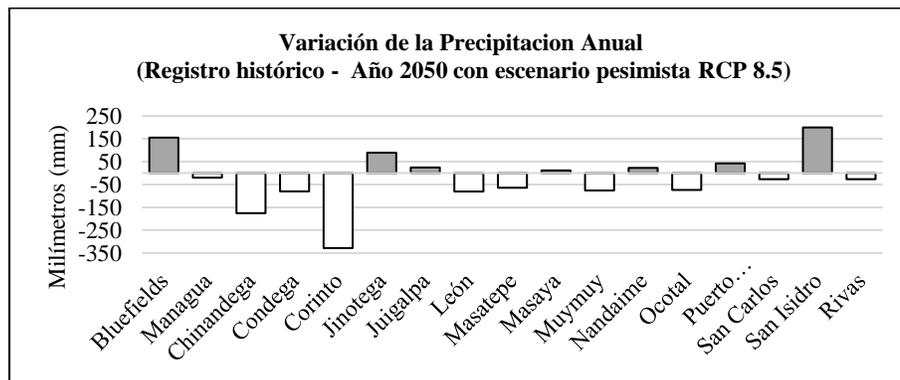


Figura 6. Variación de la precipitación anual de datos histórico vs año 2050 RCP 8.5.
Fuente: Elaboración propia partir de datos climáticos de INETER y MarkSim

El modelo hidrológico estima la precipitación media de las UHs, de modo que mientras mayor sea la superficie de esta, mayor será la sobrestimación o subestimación de la precipitación. Por ello con SWAT (ver Figura 7.) se estimó que para el año 2050 las mayores disminuciones de la precipitación se podrían presenciar en las UHs de la RACCN siendo de hasta 330.4 mm, en cambio en el Pacífico se podrían registrar aumentos de hasta 426 mm.

El aumento de las precipitaciones en las unidades ubicadas en la región del Pacífico puede deberse al comportamiento de las temperaturas ya que con el aumento de este, se induce a un incremento de la evapotranspiración y por consiguiente de la precipitación. Este aumento no garantiza que las precipitaciones se distribuyan de manera uniforme a través del tiempo, pudiendo ser unidades que presentan precipitaciones de mayor intensidad y menor frecuencia y duración.

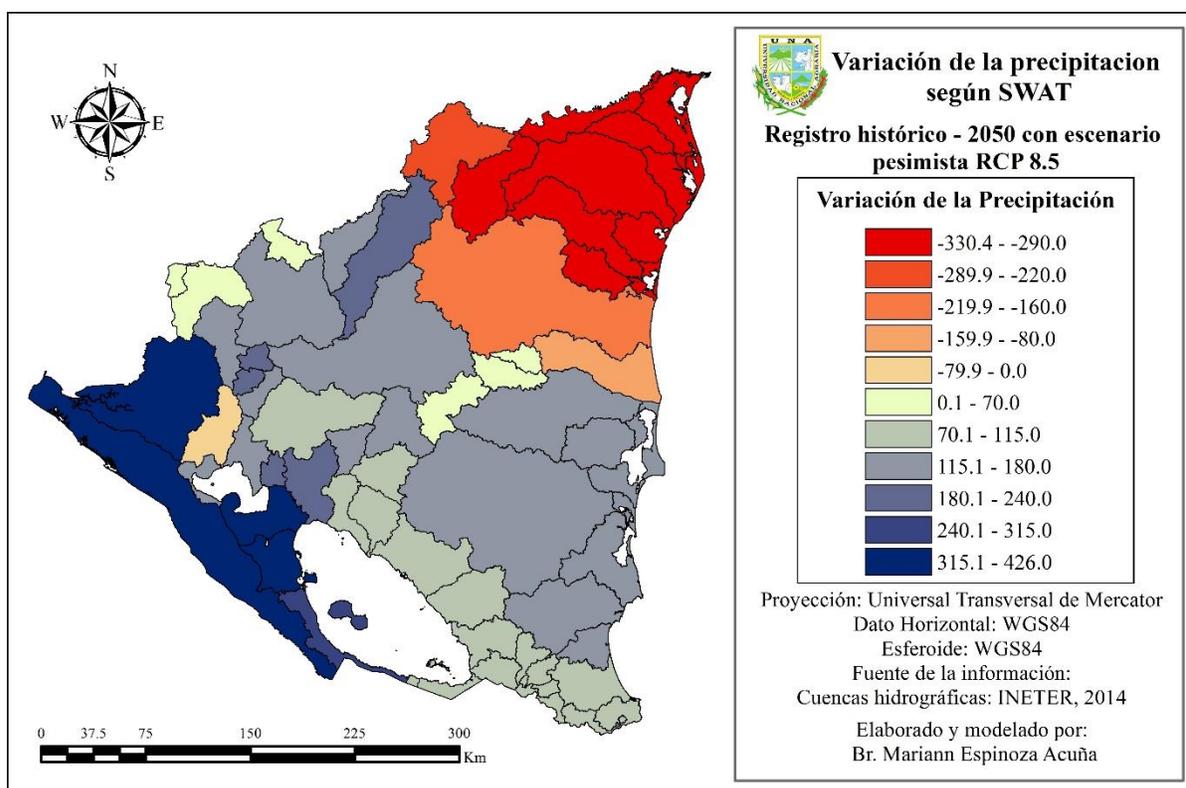


Figura 7. Variación de la precipitación anual en las unidades hidrográficas de Nicaragua según SWAT.

Para el año 2050, la temperatura media (Figura 8.) presentará una tendencia de aumento en todas las estaciones. Se espera que esta variable aumente 3.08 °C en la estación de Masatepe, seguido de Nandaime con 2.73 °C, Managua con 2.34 °C, San Carlos 2.20 °C, Corinto con 2.13 °C, San Isidro 2.03 °C y Masaya con 2.00 °C. Para el resto de las estaciones se espera como promedio un aumento de 1.46 °C.

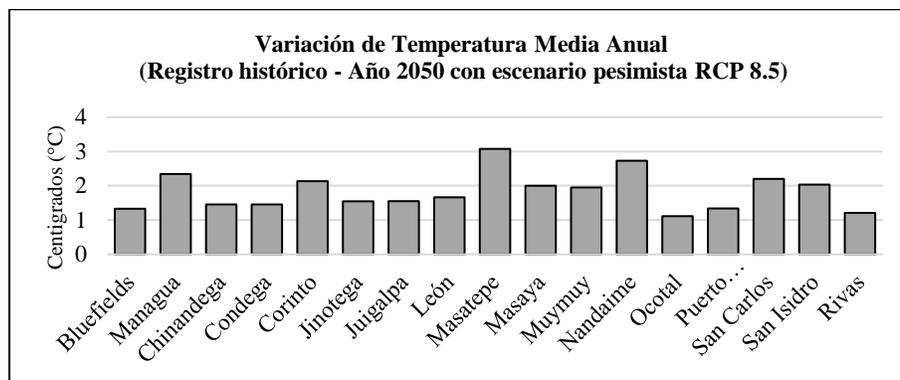


Figura 8. Variación de la temperatura media de datos históricos vs Año 2050 RCP 8.5.
Fuente: Elaboración propia partir de datos climáticos de INETER y MarkSim.

Se espera que las temperaturas máximas (Figura 9.) disminuyan 0.75 °C en la mayoría de las estaciones meteorológicas de INETER, siendo las estaciones con las mayores disminuciones la de Condega con 1.69 °C; Chinandega con 1.67 °C y Ocotal con 1.56 °C. Solo cuatro estaciones presentarán aumentos en dicha variable, siendo las estaciones de Masatepe con 1.78 °C, Nandaime con 1.32 °C, Rivas con 1.17 °C y Masaya con 0.4 °C más en comparación con la media del registro histórico de INETER.

La disminución de esta variable en la mayoría de las estaciones meteorológicas puede estar asociada con el aumento de la nubosidad a causa del incremento del forzamiento radiativo que se espera para el año 2050 con el escenario pesimista RCP 8.5. Esta variación puede incidir en la distribución de ciertas especies vegetales debido a la sensibilidad que presentan ante los aumentos o disminuciones de las temperaturas, contribuyendo de este modo al cambio del uso de la tierra en busca de condiciones climáticas óptimas para los cultivos.

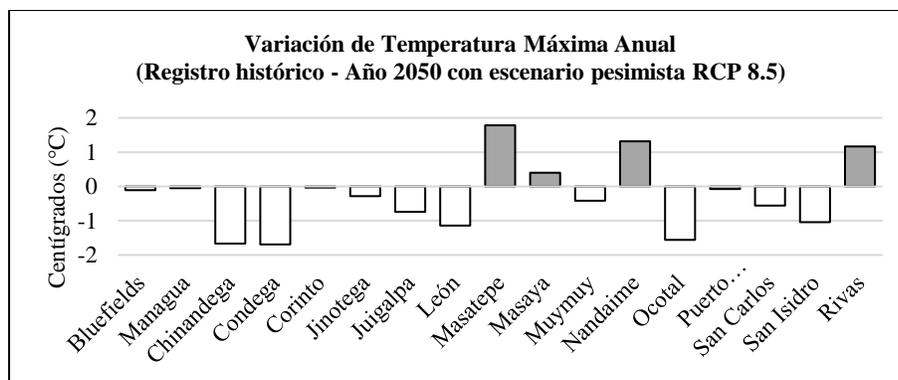


Figura 9. Variación de la temperatura máxima de datos histórico vs. Año 2050 RCP 8.5.

Fuente: Elaboración propia partir de datos climáticos de INETER y MarkSim.

En cuanto a la media de las temperaturas mínimas (Figura 10.) se espera una tendencia de aumento para todas las estaciones en comparación a la media del registro histórico de INETER, siendo la estación de San Isidro la que presento el mayor incremento, con 4.72 °C; seguido de las estación de Managua con 4.35 °C, Puerto Cabezas con 4.08 °C, Chinandega con 3.98 °C y Condega con 3.88 °C. Para las estaciones restantes se espera un aumento medio de 2.8 °C.

El aumento de esta variable y de la temperatura media inciden directamente en las pérdidas de agua por transpiración de la cobertura vegetal y por evaporación de los cuerpos de agua y de la humedad del suelo, mermando la cantidad de agua que podría infiltrarse, percolar hacia el acuífero y contribuir al caudal de los ríos, limitando la disponibilidad de agua en los acuíferos en los meses deficitarios.

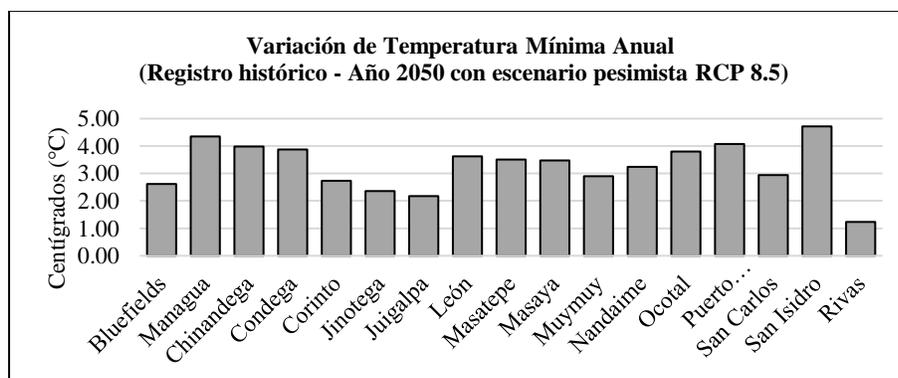


Figura 10. Variación de la temperatura mínima de datos históricos vs. Año 2050 RCP 8.5.

Fuente: Elaboración propia partir de datos de INETER y MarkSim

4.2. Descripción biofísica de las cuencas hidrográficas

4.2.1. Reclasificación de la información utilizada

Para efectuar las modelaciones hidrológicas en cada una de las UHs seleccionadas fue necesario reclasificar los mapas de cobertura forestal de INAFOR y el mapa de subórdenes de suelos de INETER.

En el cuadro 8 se presenta la reclasificación que se efectuó en los mapas de cobertura forestal de los años 2000 y 2015. Se seleccionaron 15 usos de la tierra de la base de datos SWAT para representar el comportamiento de los usos definida por INAFOR. SWAT define 3 formaciones forestales, por lo que se designó el uso de los bosque perenne (FRSE) para modelar los bosques latifoliados densos, los bosque deciduo (FRSD) para los bosques latifoliados ralos y los bosque mixto (FRSD) para las plantaciones forestales y SAFs.

Cuadro 8. Reclasificación de los mapas de cobertura forestal de Nicaragua según SWAT.

Clasificación INAFOR		Clasificación SWAT	
Año 2000	Año 2015	Código	Interpretación
Bosque latifoliado denso		FRSE	Forest-Evergreen
Bosque latifoliado ralo		FRSD	Forest-Deciduous
bosque secundario			
-	Plantación Forestal	FRST	Forest-Mixed
Bosque de conífera (denso y ralo)		PINE	Pine
Bosque de mangle		WETF	Wetlands-Forested
Humedal		WETL	Wetlands-Mixed
Vegetación acuática	Otros	WETN	Wetlands-Non-Forested
Tierra sujeta a inundación			
Bosque con palma y/o bambú		OILP	Oil Palm
Pastura		PAST	Pasture
Potrero	Agropecuario		
Cultivo		AGRL	Agricultural Land-Generic
-	Cafetal	COFF	Coffee
Sabana		RNGE	Range Grasses
Matorral		RGNB	Range Brush
Vegetación arbustiva	Tacotal		
Cuerpo de agua		WATR	Water
Sin definir		BARR	Barren
Lava	Otros		
Urbano			

Fuente: Elaboración propia a partir de los mapas de cobertura forestal de INAFOR y SWAT

Los bosques de manglares fueron modelados como humedales forestados (WETF), ya que a diferencia de los humedales mixtos (WETL) y humedales no forestados (WETN), este es el único uso relacionado con humedal que presentan cobertura forestal.

En el cuadro 9 se muestra el asocio efectuado en los subórdenes para la simulación hidrológica de las UHs. Se representaron los 21 subórdenes definidos por INETER en 13 subórdenes según la clasificación de FAO/UNESCO para obtener las propiedades físicas y químicas de estos, e incorporarla a la base de datos de SWAT.

Cuadro 9. Reclasificación de los subórdenes de suelos de Nicaragua a partir de la Clasificación Mundial de Suelos de FAO

Taxonomía de Suelos (USDA)		Clasificación Mundial de Suelos (FAO/UNESCO)	
Orden	Sub-orden	Orden Asociado	Sub-orden propuesto
Alfisol	Aqualfs	Luvisol, Nitisol	Humic Nitisol
	Udalfs		Vertic Luvisol
	Ustalfs		
Andisol	Ustands	Andosol	Mollic Andosol
	Vitrands		Vitric Andosol
Entisol	Aquents	Gleysol	Eutric Gleysol
	Fluvents	Fluvisol, Regosol	Eutric Fluvisol
	Orthents	Regosol	Eutric Regosol
	Psamments		
	Histosol	Hemists	Histosol
Inceptisol	Aquepts	Gleysol	Eutric Gleysol
	Udepts	Cambisol	Humic Cambisol
	Ustepts		Dystric Cambisol
Mollisol	Aquolls	Phaeozem	Haplic Phaeozem
	Udolls		
	Ustolls		
Oxisol	Perox	Ferrasol	Haplic Ferrasol
Ultisol	Aquults	Acrisol, Nitisol	Humic Nitisol
	Humults		Haplic Nitisol
	Udults		
	Ustults		

Fuente: Elaboración propia a partir de los mapas de subórdenes de suelo de INETER y FAO

De la superficie total de las cuenca, se analizó 113,033.54 km² (94.90%). Las pendientes planas a ligeramente escarpadas (0 a 4%) son las que más superficie ocupan en Nicaragua, siendo de 41,725.83 km² (36.91% de la superficie analizada), seguido de las pendientes moderadamente escarpadas a muy escarpadas (>15%) con 31,049.50 km² (27.47%).

En el cuadro 10 se puede observar que las cuencas que presentan mayor superficie con pendientes mayores al 15% son la del Río Coco y Río Grande de Matagalpa y las que presentan mayor superficie con planicies son las cuencas de las Regiones Autónomas del Caribe, del Río San Juan y la del Pacífico.

Cuadro 10. Distribución de las pendientes en las CH de Nicaragua

CH	Área analizada km ²	Gradiente de pendiente				
		0-4%	4-8%	8-15%	15-30%	>30%
RC	18,126.43	2,362.17	2,604.24	3,337.29	5,542.37	4,280.37
RACCN	22,921.67	14,272.44	4,078.01	1,956.30	1,772.62	842.29
RGM	18,615.13	4,295.16	3,427.93	3,663.84	4,718.57	2,509.63
RACCS	24,321.94	9,077.17	6,356.48	4,958.66	3,395.10	534.53
RSJ	18,299.96	7,160.90	3,247.66	3,135.16	3,253.21	1,503.03
PC	10,748.41	4,557.99	1,864.50	1,628.14	1,780.43	917.35
Total	113,033.54	41,725.83	21,578.82	18,679.39	20,462.30	10,587.20

CH: Cuenca Hidrográfica; RC: Río Coco; RACCN: Región Autónoma de la Costa Caribe Norte; RGM: Río Grande de Matagalpa; RACCS: Región Autónoma de la Costa Caribe Sur; RSJ: Río San Juan; PC: El Pacífico
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de elevación digital de Nicaragua

Para la descripción de las 6 CH de Nicaragua se analizaron 66 UHs (ver Cuadro 11). De estas UHs, 29 (43.93% del total de UHs) presentaron una respuesta hidrológica deficitaria (P-ETP < 0), es decir las precipitaciones en las unidades no son suficiente para satisfacer las necesidades de agua de la cobertura vegetal que posee y el aporte de agua al caudal es mínimo o nulo. Se delimitaron 3,759 subunidades, de las cuales 1,422 se encuentran en las 29 UHs deficitarias.

Cuadro 11. Unidades hidrográficas modeladas con SWAT

CH	No. De UHs	UHs que aportan (P-ETP > 0)		UHs deficitarias (P-ETP < 0)	
		Código	Subund	Código	Subund
RC	9	95161-95163	310	95164-95169	274
RACCN	9	95171-95179	486	-	-
RGM	9	95181-95183	277	95184-95189	185
RACCS	9	95191-95199	432	-	-
RSJ	27	95211, 95213, 95219, 95231, 95233, 95234, 95236-95239, 95251, 95252, 95254	832	95253, 95255-95259, 95291-95298	645
PC	3	-	-	953375, 953376, 953385	318
Total	66	37	2337	29	1422

CH: Cuenca Hidrográfica; UH: Unidad Hidrográfica; Subund: Subunidad; RC: Río Coco; RACCN: Región Autónoma de la Costa Caribe Norte; RGM: Río Grande de Matagalpa; RACCS: Región Autónoma de la Costa Caribe Sur; RSJ: Río San Juan; PC: El Pacífico

Fuente: Elaboración propia a partir de la modelación hidrológica con SWAT

A continuación se presenta la descripción de cada CH analizada partiendo de los gradientes de pendientes y la reclasificación de los subórdenes de suelos y usos de la tierra.

4.2.2. Cuenca del Río Coco

En la CH del Río Coco se analizó 18,126.43 km², representando el 95.52% de la superficie total de la cuenca. De las nueve UHs que posee, seis presentaron un comportamiento hidrológico deficitario, es decir en 12,697.56 km² (70.05%) se simuló con la propuesta de uso de la tierra (SAFs) para el año 2050.

Pendiente, tipo de suelo y uso de la tierra

La distribución de las pendientes en las tres UHs categorizadas como unidades que aportan agua a la red de drenaje (ver Figura 11.), se encuentra en proporciones casi homogéneas. El rango que presenta menos extensión es la escarpado a muy escarpado (>30%), con 454.99 km² (7.97% de la superficie analizada). Esto resulta una característica a favor a estas unidades para definir las como unidades que aportan.

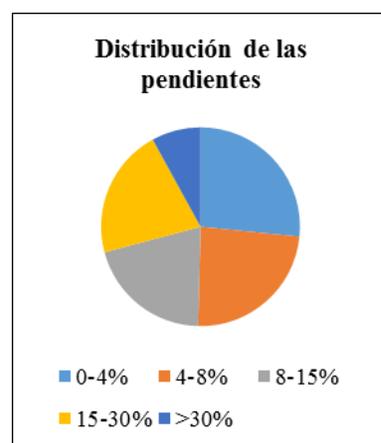


Figura 11. Distribución de las pendientes en las tres UHs que aportan al caudal al Río Coco

En cambio, en las seis UHs deficitarias (ver Figura 12.), las pendientes dominantes son moderadamente escarpadas a muy escarpadas, factor que influye fuertemente en la tasas de escurrimiento superficial y sedimentación.

Las áreas con 15 a 30% de pendiente ocupan 4,337.09 km² (34.91%) y las áreas con pendientes mayores al 30%, 3,825.37 km² (30.79%), por lo que se ha propiciado la agricultura en ladera como una necesidad principalmente ante la ausencia de suficientes terrenos en planicies, las cuales apenas se encuentran en 843.10 km² (6.78%).

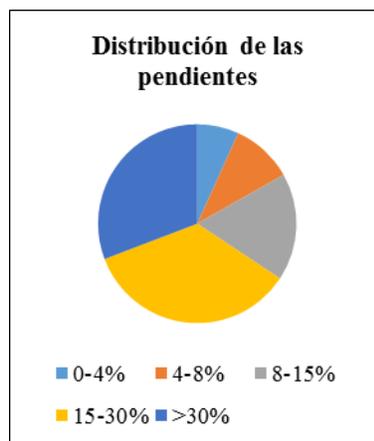


Figura 12. Distribución de las pendientes en las seis UHs deficitarias del Rio Coco

En estas UHs las pendientes mayores al 15% se encuentran en 8,162.47 km² (65.71%), de la cual 3,552.74 km² (28.59%) están siendo utilizadas por la agricultura y ganadería; en la superficie restante se encuentran bosques latifoliados densos.

Las UHs que aportan agua al caudal presentan mayoritariamente suelos Haplic Nitisol, los cuales ocupan 1,516.27 km² (80.46%). Estos suelos rojizos en su mayoría se encuentran ocupados por bosques latifoliados densos. (ver Cuadro 12.)

Cuadro 12. Subórdenes de suelos presentes en las nueve UHs del Rio Coco

Sub-orden	Superficie			
	UHs que aportan		UHs deficitarias	
	km ²	%	km ²	%
Humic Nitisol	4,588.97	80.46	4,455.68	35.87
Haplic Nitisol	828.18	14.52	2,229.56	17.95
Haplic Phaeozem	-	-	1,791.05	14.42
Eutric Regosol	-	-	1,735.81	13.97
Humic Cambisol	234.26	4.11	954.86	7.69
Eutric Gleysol	42.39	0.74	-	-
Dystric Cambisol	-	-	808.51	6.51
Afloramiento rocoso	9.94	0.17	289.65	2.33
Vertic Luvisol	-	-	114.38	0.92
Eutric Vertisol	-	-	43.38	0.35
Total	5,703.74	100	12,422.88	100

En comparación con las UHs deficitarias, las UHs que aportan agua al caudal no presentan superficies de suelos Haplic Phaeozem, Eutric Regosol, Dystric Cambisols, Vertic Luvisol y Eutric Vertisol.

En las UHs deficitarias, los suelos dominantes son los Nitisol, los cuales ocupan 6,685.25 km² (53.82%), seguido de los Haplic Phaeozem y Eutric Regosol, con 1,791.05 km² (14.42%) y 1,735.81 km² (13.97%), respectivamente.

Los suelos Haplic Nitisol se encuentran ocupados principalmente con bosques latifoliados y pinares en pendientes planas a fuertemente inclinadas, y actividades agrícolas en pendiente moderadas a muy escarpadas. En el caso de los Humic Nitisol, es común encontrar usos agropecuarios en pendientes moderadas y en menor proporción, bosques latifoliados densos. Los Haplic Phaeozem son suelos fértiles y Eutric Regosol, débiles y de lenta formación, los cuales están localizados en pendientes moderadamente escarpadas (15-30%) con agricultura como uso dominante y tacotales; son muy susceptibles a la erosión.

La cobertura vegetal define indudablemente el comportamiento hidrológico de las unidades, y esto se puede apreciar en el cuadro 13, con la vocación forestal que presentan las UHs que aportan al caudal.

En el año 2000 estas unidades tenían un área de 5,178.39 km² (90.79%) con bosques latifoliados, de los cuales 5,015.91 km² (87.94%) correspondían a bosques densos. Para el 2015 los bosques latifoliados ocupaban un área de 5,030.96 km² (88.2%), observándose una disminución de las superficies de los bosques densos de 721.37 km² (12.65%) y un aumento en los bosques ralos de 573.94 km² (10.06%). Si bien se presentaron cambios en la extensión de los bosques latifoliados densos en un período de 15 años, esto no resultó ser significativo para influir en el comportamiento hidrológico de las unidades en cuestión.

Las superficies agropecuarias ocupaban 102.75 km² (1.8% del área total de las UHs que aportan), y en un lapso de 15 años, estas incrementaron, a 238.10 km² (4.17%) principalmente en pendientes de planas a ligeramente inclinadas y moderadamente escarpadas.

En las UHs deficitarias, para el año 2000 predominaba el uso agropecuario, con un área aproximada de 6,176.68 km² (49.72%), de este uso aproximadamente 3,551.70 km² (28.59%) estaban ubicadas en pendientes mayores a 15%. Los bosques latifoliados densos, ocupaban un área de 3,808.79 km² (30.65%). Para el año 2015 las áreas agropecuarias y los bosques densos sufrieron una reducción de 318.05 km² (2.56 %) y 1,100.41 km² (8.85%) respectivamente. Así mismo, los bosques ralos aumentaron 964.17 km² (8.86%), por lo que puede ser debido al aprovechamiento forestal al que se ha sometido la CH, convirtiendo las superficies de bosques densos en bosques ralos.

Es relevante mencionar que en el año 2015 se hicieron significativas las áreas destinadas al cultivo del café como actividad económica, ocupando 888.68 km² (7.15%). Con la recomendación propuesta, se pretende reducir el 28.67% (3,561.07 km²) de las extensiones agropecuarias por SAFs.

Cuadro 13. Cambios en el uso de la tierra en las nueve UHs del Río Coco. Años 2000, 2015 y 2050 con recomendaciones

Uso de la tierra	Superficie UHs que aportan				Superficie UHs deficitarias					
	Año 2000		Año 2015		Año 2000		Año 2015		Año 2050-R	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
AG	102.75	1.80	238.10	4.17	6,176.68	49.72	5,858.63	47.16	2,297.57	18.49
TE	0.29	0.00	0.26	0.00	37.07	0.30	7.88	0.06	7.88	0.06
C	-	-	-	-	0.00	-	888.68	7.15	888.68	7.15
BLR	162.48	2.85	736.42	12.91	605.92	4.88	1,570.10	12.64	1,570.10	12.64
BLD	5,015.91	87.94	4,294.54	75.29	3,808.79	30.66	2,708.39	21.80	2,708.39	21.80
PF/SAF	-	-	6.00	0.11	-	-	0.10	0.00	3,561.17	28.67
BPn	279.53	4.90	291.22	5.11	554.95	4.47	558.19	4.49	558.19	4.49
T	31.13	0.55	42.77	0.75	1,231.24	9.91	825.47	6.64	825.47	6.64
Tsv	70.65	1.24	38.59	0.68	-	-	0.01	0.00	0.01	0.00
A	8.93	0.16	5.61	0.10	7.37	0.06	5.24	0.04	5.24	0.04
M	0.04	0.00	0.01	0.00	0.13	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
H	27.68	0.49	49.67	0.87	0.63	0.01	0.19	0.00	0.19	0.00
TI	4.34	0.08	0.56	0.01	0.07	0.00	-	-	-	-
Total	5,703.74	100	5,703.74	100	12,422.88	100	12,422.88	100	12,422.88	100

R: Año con propuesta de uso; AG: Agropecuario; TE: Tierra estéril; C: Cafetal; BLR: Bosque latifoliado ralo; BLD: Bosque latifoliado denso; PF: Plantación Forestal; SAF: Sistema agroforestal; BPn: Bosque de Pino; T: Tacotal; Tsv: Tierra sin vegetación; A: Agua; M: Manglar; H: Humedal; TI: Tierra inundada.

Unidades de respuesta hidrológica dominante

En la CH del Río Coco con la propuesta de uso para el año 2050 se obtuvo que 156 subunidades de las 274 delimitadas en las UHs deficitarias, cambiaron su HRUD en comparación al año 2015.

En el cuadro 14 se muestra que de las 156 subunidades, 136 pasaran de presentar un uso agropecuario en pendiente mayor a 15% a ser subunidades con SAFs. Las restantes adoptarán los bosques latifoliados, tacotales y pinares como uso predominante a influencia de la reducción de la superficie ocupada por las actividades agropecuarias. Solo en 2 subunidades se sustituyó la actividad agropecuaria por la cafcultura como mayor uso en pendientes mayores a 15%.

Cuadro 14. Cambios en las HRUD de las subunidades del Río Coco

Año 2015		Año 2050-R		Cant.	Año 2015		Año 2050-R		Cant.			
Uso	Pendiente	Uso	Pendiente		Uso	Pendiente	Uso	Pendiente				
AG	0-4%	BLR		1	AG	>30%	BLD	15-30%	2			
		SAF	0-4%	1			SAF		2			
		T		1			C		1			
	8-15%	BLR	8-15%	1			BLR		1			
		C		1			BLD	>30%	2			
		BLR		3			SAF		76			
	15-30%	BLD	15-30%	3			BPn		1			
		SAF		57								
		BPn		1								
		T		2								
	Subtotal						71	Subtotal				85
								Total				156

R: Año con propuesta de uso; AG: Agropecuario; C: Cafetal; BLR: Bosque latifoliado ralo; BLD: Bosque latifoliado denso; PF: Plantación Forestal; SAF: Sistema agroforestal; BPn: Bosque de Pino; T: Tacotal.

Los cambios por SAFs en pendientes mayores al 15% son mayoritariamente visibles en los municipios de Condega y Pueblo Nuevo, Las Sabanas, San Lucas, Telpaneca, el este de Palacagüina, Wiwilí, San Sebastián de Yalí, el suroeste de El Cuá, el norte de San Rafael del Norte, Santa María de Pantasma, Murra, el este de Ciudad Antigua, San Fernando, Jalapa, El Júcaro, y Quilalí.

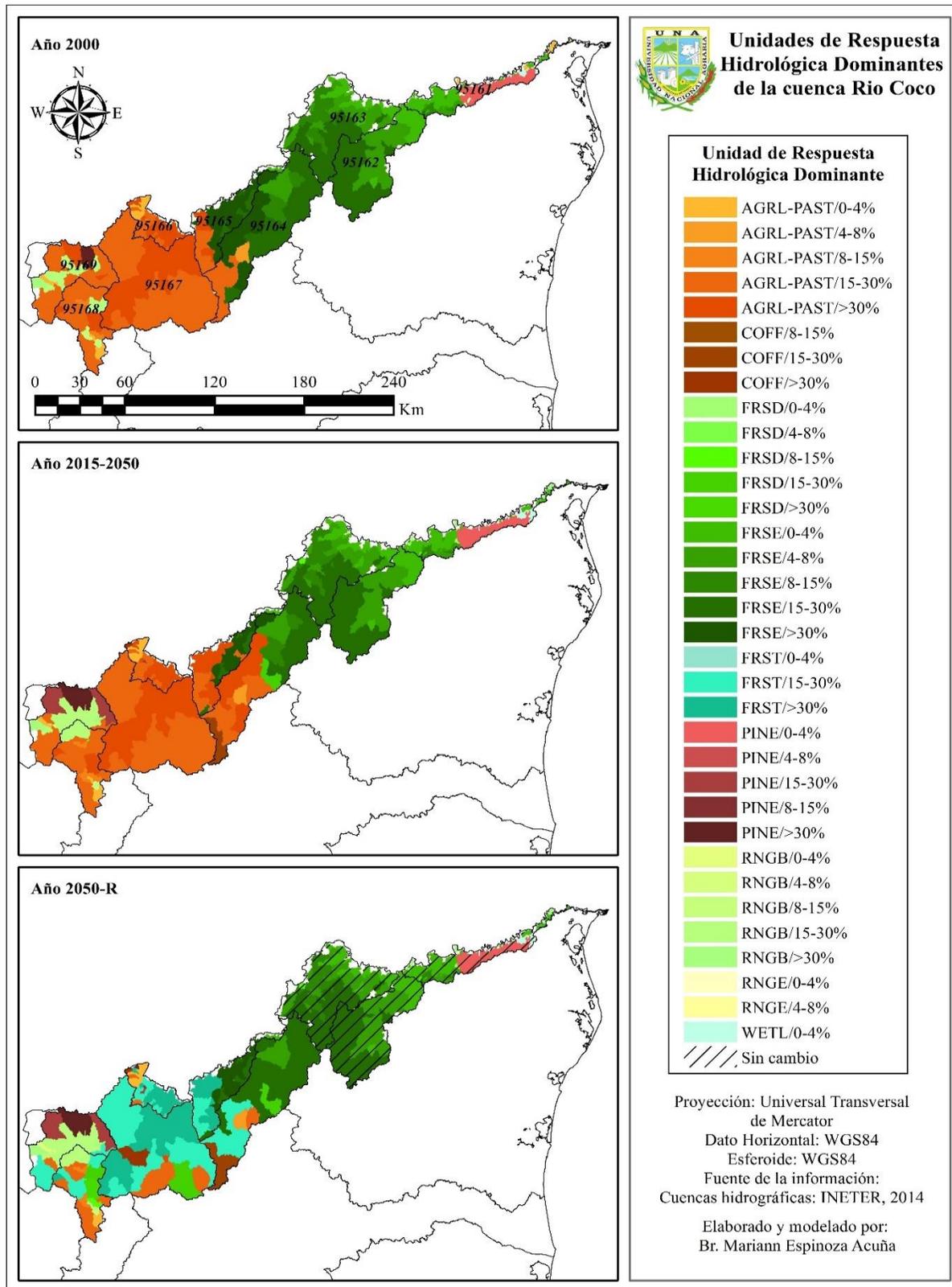


Figura 13. Unidades de respuesta hidrológica dominante de las nueve unidades hidrográficas del Río Coco.

4.2.3. Cuenca de la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte

En la CH de la RACCN se analizó 22,921.67 km² representando el 88.11% de la superficie total de la cuenca. Las nueve UHs que posee la CH presentaron un comportamiento hidrológico de aporte de agua al caudal, por lo que la simulación con el clima futuro y con la propuesta de cambio del uso de la tierra para año 2050 no se efectuó.

Pendiente, tipo de suelo y uso de la tierra

Las CH presenta mayormente un relieve de llanura, es decir 14,272.44 km² (62.26% de la superficie analizada) con pendientes planas a ligeramente inclinadas (0-4%), principal razón por la cual las actividades agropecuarias y los humedales, manglares y tierras inundadas ocupan 9,553.02 km² (41.68%) en el año 2015.

Los terrenos con pendientes mayores al 15% (11.4%) se encuentran primordialmente ocupados por bosques de pinos y latifoliados.

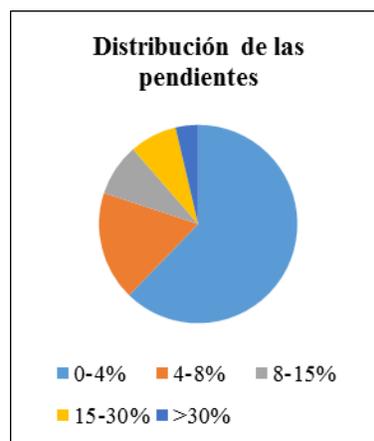


Figura 14. Distribución de las pendientes de las nueve UHs que aportan en la RACCN.

Cuadro 15. Subórdenes de suelos presentes en las nueve UHs de la RACCN

Sub-orden	Superficie	
	km ²	%
Haplic Nitisol	12,955.47	56.52
Humic Nitisol	6,244.48	27.24
Eutric Gleysol	3,339.44	14.57
Humic Cambisol	248.75	1.09
Agua	66.10	0.29
Eutric Regosol	33.88	0.15
Afloramiento rocoso	33.55	0.15
Total	22,921.67	100

El suborden de suelos que más predomina en la cuenca es el Haplic Nitisol, ocupando 12,955.47 km² (56.52%) de la superficie total; seguidos del Humic Nitisol, y Eutric Gleysol. El orden que menor superficie ocupa es el Eutric Regosol, con 33.55 km² (0.15%). (Ver Cuadro 15).

Los Haplic Nitisol se encuentran principalmente ocupados con humedales, bosques latifoliados y pinares, o están desprovistas de vegetación en pendientes planas a ligeramente inclinadas (0-4%). En el caso de los Humic Nitisol, también se encuentran en pendientes planas a ligeramente inclinadas, con bosques latifoliados y humedales.

Los Eutric Gleysol por lo general se encuentran saturados con agua freática, y estos si son drenados pueden ser utilizados con fines productivos, por ello el uso predominante corresponde a los humedales en pendientes planas. Estos también poseen superficies con bosques latifoliados ralos, bosque de palma y tacotales, por lo que se induce que algunas de estas superficies se encuentran drenadas.

Es evidente la vocación forestal que presentaba esta CH hace 17 años atrás (ver Cuadro 16.). Los bosques latifoliados densos poseían en el año 2000, una superficie de 11,632.91 km² (50.75%) y los bosques latifoliados ralos, pinares, manglares y tacotales ocupaban 3,693.66 km² (16.11%). Las actividades agropecuarias solamente ocupaban 2,129.6 km² (9.29%)

Cuadro 16. Cambios en el uso de la tierra en las nueve UHs de la RACCN. Años 2000 y 2015.

Uso de la tierra	Superficie			
	Año 2000		Año 2015	
	km ²	%	km ²	%
AG	2,129.60	9.29	5,212.23	22.74
TE	6.67	0.03	12.80	0.06
BLR	895.95	3.91	3,357.51	14.65
BLD	11,632.91	50.75	5,372.88	23.44
PF/SAF	-	-	0.21	0.00
BPI	5.52	0.02	259.55	1.13
BPn	1,562.82	6.82	1,599.29	6.98
T	1,018.89	4.45	1,408.46	6.14
Tsv	2,094.89	9.14	1,227.32	5.35
A	143.51	0.63	130.63	0.57
M	216.01	0.94	381.65	1.67
H	2,952.30	12.88	3,891.33	16.98
TI	262.61	1.15	67.81	0.30
Total	22,921.67	100	22,921.67	100

AG: Agropecuario; TE: Tierra estéril; BLR: Bosque latifoliado ralo; BLD: Bosque latifoliado denso; PF: Plantación Forestal; SAF: Sistema agroforestal; BPI: Bosque de Palma; BPn: Bosque de Pino; T: Tacotal; Tsv: Tierra sin vegetación; A: Agua; M: Manglar; H: Humedal; TI: Tierra inundada.

En el año 2015 se observa un aumento de 3,082.63 km² (13.45%) del uso agropecuario y una disminución notable de los bosques latifoliados densos, los cuales se redujeron 6,260.03 km² (27.31%). Este cambio notable en la cobertura forestal pudo haberse debido a las afectaciones que causo el paso del huracán Félix, por lo que se asume que las áreas devastadas por el huracán se aprovecharon para establecer cultivos anuales y ganadería.

Las superficies ocupadas por los humedales y tierras inundadas aumentaron 744.23 km² (3.25%) en relación a la superficie que ocupaban en el 2000, pudiendo esto relacionarse con la vulnerabilidad misma que presenta la región ante las inundaciones (llanuras con pendientes de 0-2%) por el aumento del escurrimiento superficial. Se observa también un aumento de 254.03 km² (1.11%) en las superficies de bosques de palma.

Unidades de respuesta hidrológica dominante

En la CH de la RACCN se delimitaron 486 subunidades, de las cuales en un período de 15 años (2000-2015) 157 presentaron una HRUD diferente. En el cuadro 17 se muestra que de las 157 subunidades con cambios, 33 pasaron de presentar bosques latifoliados densos a ser subunidades con usos agropecuarios como predominantes, evidenciándose el avance de las actividades agropecuarias propiciado principalmente por el paso del huracán Félix en las masas forestales. De estas 33 subunidades, cuatro presentan pendientes mayores al 15%.

Cuadro 17. Cambios de HRUD de subunidades de la RACCN

Año 2000		Año 2015		Cant.	Año 2000		Año 2015		Cant.							
Uso	Pendiente	Uso	Pendiente		Uso	Pendiente	Uso	Pendiente								
AG	0-4%	BLR	0-4%	1	Tsv	0-4%	BLR	0-4%	1							
BLD	0-4%	AG	0-4%	28			BPn		0-4%	7						
		BLR		20			M			1						
		BPI		1			H			26						
		BPn		3			A			0-4%	H	0-4%	1			
		T		5			M			0-4%	H	0-4%	1			
		M		2			H			A	0-4%	A	0-4%	1		
		H		14						M	0-4%	M	0-4%	8		
		4-8%		AG			4-8%			1	TI	0-4%	8-15%	AG	8-15%	1
		8-15%		BLR			8-15%			1			BLR	2		
		15-30%		AG	15-30%	3	BPn	3								
BPn	0-4%	H	0-4%	5	T	0-4%	T	0-4%	2							
					M	5										
T	0-4%	BLR	0-4%	1	H	2										
		BLD		1												
		H		9												
Subtotal				96	Sub total				61							
					Total				157							

AG: Agropecuario; BLR: Bosque latifoliado ralo; BLD: Bosque latifoliado denso; PF: Plantación Forestal; SAF: Sistema agroforestal; BPI: Bosque de Palma; BPn: Bosque de Pino; T: Tacotal; A: Agua; M: Manglar; H: Humedal; TI: Tierra inundada.

También es visible el cambio de 14 subunidades con tierras inundadas a humedales, manglares, bosques latifoliados densos, bosque de palma y tacotales; y 35 subunidades con tierras sin vegetación en el año 2000, de las cuales nueve presentaron bosque de pino, bosque latifoliado y manglar; y las 26 restantes presentaron humedales como uso dominante en el año 2015.

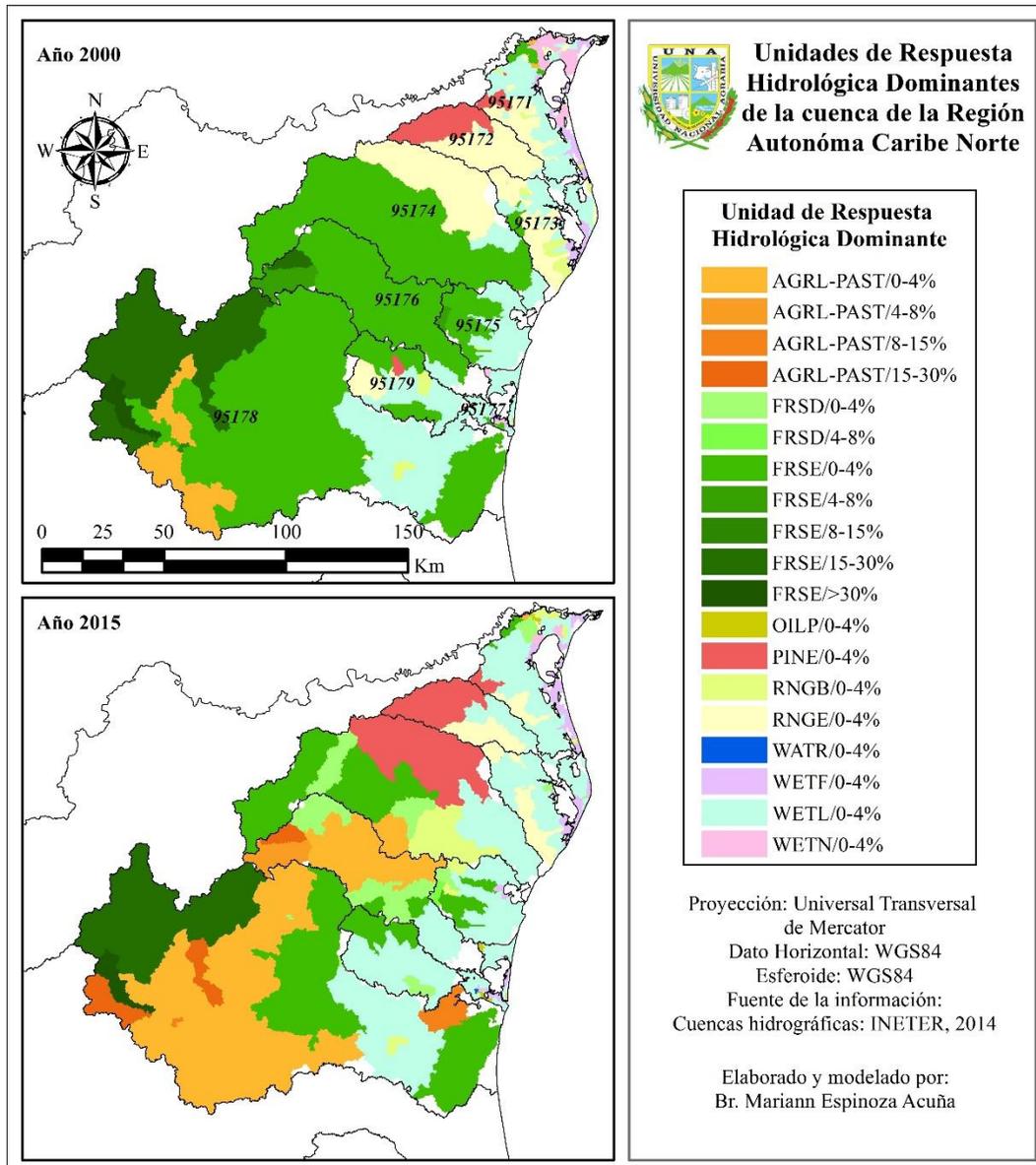


Figura 15. Unidades de respuesta hidrológica dominante de las nueve unidades hidrográficas de la RACCN.

4.2.4. Cuenca del Río Grande de Matagalpa

En la CH del Río Grande de Matagalpa se analizó 18,615.13 km² representando el 98.71% de la superficie total de la cuenca. De las nueve UHs que posee, seis presentaron un comportamiento hidrológico deficitario, es decir en 15,165.74 km² (81.47%) se simuló con la propuesta de uso de la tierra (SAFs) para el año 2050.

Pendiente, tipo de suelo y uso de la tierra

Las tres UHs clasificadas como unidades que aportan al caudal (ver Figura 16.) se encuentran ubicadas en la planicie costera del Caribe, por lo que cuentan con 2,155.83 km² (62.15%) con pendientes planas a ligeramente inclinadas. Tan solo 6.06 km² (0.17%) de la superficie total de estas presentan pendientes mayores de 30%.

Las pendientes en las UHs deficitarias (ver Figura 17.) se encuentran distribuidas de un manera casi homogénea, sin embargo, en esta cuenca predominan pendientes mayores al 15%, las cuales ocupa 7,167.17 km² (47.31%). Las pendientes de 15-30% ocupan un área de 4,663.60 km² (30.78%) y pendientes de 8-15% están en 3,394.23 km² (22.41%) con uso agropecuario. Esta tendencia de agricultura y ganadería en pendientes escarpadas es lo que influye directamente en las pérdidas de suelo por erosión hídrica

En cuanto a los subórdenes de suelo (ver Cuadro 18.), en las UH que aporta al caudal, el orden predominante corresponde a los Nitisol los que ocupan casi la totalidad de la superficie total de las tres unidades, con 3,004.58 km² (86.62%), con usos principalmente agropecuarios en pendientes entre 0 a 15%.

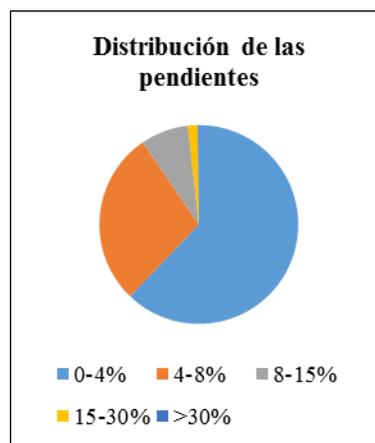


Figura 16. Distribución de las pendientes en las tres UHs que aportan del Río Grande de Matagalpa

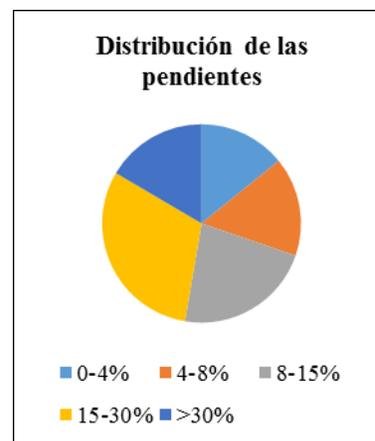


Figura 17. Distribución de las pendientes en las seis UHs deficitarias del Río Grande de Matagalpa

También poseen 453.16 km² (13.06%) de suelos Eutric Gleysol en pendientes planas con usos de vocación forestal (bosques latifoliados y pinares), y agropecuario en pendientes de 0 a 4%.

En las UHs deficitarias, los suelos Humic Nitisol ocupan 7,918.64 km² (52.27% de la superficie total de estas UHs), seguido de Haplic Phaeozem con 3,338.61 km² (22.04%) y Haplic Nitisol, con 1,725.72 km² (11.39%).

Cuadro 18. Subórdenes de suelos presentes en las nueve UHs del Rio Grande de Matagalpa

Estos tres sub-órdenes se encuentran utilizados por actividades agropecuarias en cualquier rango de pendiente; sin embargo, las pendientes moderadamente escarpadas (15-30%) son las que se encuentran más utilizadas con este uso de la tierra.

Sub-orden	Superficie			
	UHs que aportan		UHs deficitarias	
	km ²	%	km ²	%
Humic Nitisol	1,877.66	54.13	7,918.64	52.28
Haplic Phaeozem	1,126.92	32.49	3,338.61	22.04
Haplic Nitisol	-	-	1,725.72	11.39
Eutric Regosol	10.19	0.29	833.69	5.50
Eutric Vertisol	-	-	530.06	3.50
Vertic Luvisol	-	-	268.66	1.77
Dystric Cambisol	-	-	185.00	1.22
Afloramiento rocoso	-	-	138.39	0.91
Humic Cambisol	-	-	102.64	0.68
Eutric Gleysol	453.16	13.06	59.22	0.39
Agua	0.59	0.02	45.99	0.30
Total	3,468.51	100	15,146.61	100

En cuanto al uso de la tierra (Cuadro 19), las UHs que aportan están principalmente ocupadas con bosque latifoliados densos, y estos en conjunto con la predominancia de pendientes planas a ligeramente inclinadas, contribuye a que el escurrimiento y sedimentación sea mínimo o menor en comparación con las UHs deficitarias.

Si bien la cobertura forestal (bosques latifoliados y pinos) en las UHs que aportan disminuyó 547.54 km² (15.79%), repercutiendo en un aumento de 664.04 km² (19.14%) en las área con agricultura y ganadería en un lapso de 15 años, el comportamiento hidrológico de estas no se vio afectado por la topografía que les favorece y por la cantidad de precipitación que recibe anualmente. Se observó también la disminución de 55.28 km² de superficies de los manglares y humedales.

En cuanto a las UHs deficitarias, se observaron cambios en las superficies agropecuarias. En el año 2000, 10,101.07 km² (66.69%) presentaban usos agropecuarios, la mayoría confinadas en pendientes fuertemente inclinadas a muy escarpadas (>30%). Esta extensión se redujo solo 779.4 km² (5.14%) en el año 2015, lo cual puede estar asociado con la clasificación de la Caficultura como uso independiente del agropecuario, el cual para dicho año ocupa 889.33 km² (5.87%).

Cuadro 19. Cambios en el uso de la tierra en las nueve UHs del Río Grande de Matagalpa. Años 2000, 2015 y 2050 con recomendaciones

Uso de la tierra	Superficie UHs que aportan				Superficie UHs deficitarias					
	Año 2000		Año 2015		Año 2000		Año 2015		Año 2050-R	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
AG	785.48	22.65	1,449.52	41.79	10,101.07	66.69	9,321.67	61.54	5,503.53	36.34
TE	21.97	0.63	0.41	0.01	11.30	0.07	6.99	0.05	6.99	0.05
C	-	-	-	-	-	-	889.33	5.87	889.33	5.87
BLR	221.60	6.39	190.74	5.50	801.76	5.29	2,356.78	15.56	2,356.78	15.56
BLD	2131.53	61.45	1658.46	47.81	2745.64	18.13	1,449.94	9.57	1,449.94	9.57
PF/SAF	-	-	-	-	-	-	0.09	0.00	3,818.24	25.21
BPI	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-
BPn	88.15	2.54	44.54	1.28	18.63	0.12	14.33	0.09	14.33	0.09
T	15.69	0.45	5.53	0.16	1,385.37	9.15	1,036.28	6.84	1,036.28	6.84
Tsv	35.67	1.03	11.67	0.34	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
A	38.93	1.12	40.85	1.18	64.49	0.43	69.59	0.46	69.59	0.46
M	4.11	0.12	0.40	0.01	0.44	0.00	0.05	0.00	0.05	0.00
H	117.65	3.39	66.07	1.90	17.51	0.12	1.54	0.01	1.54	0.01
TI	7.74	0.22	0.32	0.01	0.41	0.00	-	-	-	-
Total	3,468.51	100	3,468.51	100	15,146.61	100	15,146.61	100	15,146.61	100

R: Año con propuesta de uso; AG: Agropecuario; TE: Tierra estéril; C: Cafetal; BLR: Bosque latifoliado ralo; BLD: Bosque latifoliado denso; PF: Plantación Forestal; SAF: Sistema agroforestal; BPI: Bosque de Palma; BPn: Bosque de Pino; T: Tacotal; Tsv: Tierra sin vegetación; A: Agua; M: Manglar; H: Humedal; TI: Tierra inundada.

Los cambios en las masas forestales fueron notables, los bosques densos perdieron 1,295.71 km² (8.55%), es decir un poco más de la mitad de la superficie que ocupaba en el año 2000. Por otra parte, hubo un aumento de los bosques ralos de 1,555.02 km² (10.27%) el cual puede estar relacionado con la disminución de los tacotales de 349.1 km² (2.3%) debido a la posible conservación de estos y por el aprovechamiento de los bosques densos convirtiéndose en ralos.

Con la sustitución de las superficies agropecuarias en pendientes mayores al 15% por SAFs, se espera reducir 3,818.15 km² (25.21%) de superficies vulnerables ante la degradación del suelo.

Unidades de respuesta hidrológica dominante

En la CH del Río Grande de Matagalpa con la propuesta de uso para el año 2050 se obtuvo que 51 subunidades de las 185 delimitadas en las UHs deficitarias, cambiaron su HRUD en comparación al año 2015.

En el cuadro 20 se muestra que de las 51 subunidades con cambios en su HRUD, 35 pasaron de presentar un uso agropecuario en pendiente mayor a 15% a ser subunidades con SAFs. Las restantes adoptaron los bosques latifoliados, tacotales y cafetales como uso predominante a influencia de la reducción de la superficie ocupada por las actividades agropecuarias. Solo en una subunidad se sustituyó la dominancia del tacotal, por SAFs en pendientes mayores a 15%.

Los cambios por SAFs en pendientes mayores al 15% se encuentran principalmente en los municipios Rancho Grande, Tuma-Ladalia, el sur de Río Blanco, San Ramón, el norte de Matiguas, Matagalpa, San Dionisio, Terrabona, Esquí-pulas, el este de Sébaco, el oeste de Bocanas de Paiwás, el oeste de Waslalá, el norte de Camoapa, el sur y este de Jinotega

Cuadro 20. Cambios en las HRUD de las subunidades del Río Grande de Matagalpa

Año 2015		Año 2050-R		Cant.
Uso	Pendiente	Uso	Pendiente	
AG	0-4%	T	0-4%	1
	8-15%	BLR	8-15%	1
		SAF	15-30%	1
	15-30%	C		1
		BLR		9
		BLD	15-30%	1
		SAF		30
	>30%	T		1
		BLD		1
		SAF	>30%	4
T	15-30%	SAF	15-30%	1
Total				51

R: Año con propuesta de uso; AG: Agropecuario; C: Cafetal; BLR: Bosque latifoliado ralo; BLD: Bosque latifoliado denso; PF: Plantación Forestal; SAF: Sistema agroforestal; T: Tacotal.

4.2.5. Cuenca de la Región Autónoma de la Costa Caribe Sur

En la CH de la RACCS se analizó 24,321.94 km² representando el 94.8% de la superficie total de la cuenca. Las nueve UHs que posee la CH presentaron un comportamiento hidrológico de aporte de agua al caudal, por lo que la simulación con el clima futuro y con la propuesta de cambio del uso de la tierra para año 2050 no se efectuó.

Pendiente, tipo de suelo y uso de la tierra

La cuenca de la RACCS presenta pendientes planas a inclinadas (0 a 8%) en 15,433.65 km² (63.45% de la superficie total analizada), esta característica favorece a la agricultura y ganadería en la zona, sin embargo, este tipo de relieve está dominada por bosques latifoliados densos.

El desarrollo de actividades agropecuarias se encuentra con mayor frecuencia en pendientes fuertemente inclinadas (8 a 15%) debido a los problemas de inundación que se presentan en las planicies de la cuenca. Las superficies con pendientes mayores a 15% se encuentran principalmente ocupadas por bosque latifoliados densos con un área de 2,772.7 km² (11.4%).

Los subórdenes predominantes (ver Cuadro 21.) son los Haplic Nitisol con 14,423.27 km² (59.30%), seguido de los Humic Nitisol y Eutric Gleysol, con 5,813.86 km² (23.90%) y 2,061.73 km² (8.47%), respectivamente.

Los Nitisol en esta cuenca, se encuentran principalmente ocupados con bosques latifoliados densos y áreas con fines agropecuarios, principalmente en pendientes planas a fuertemente inclinadas, es decir de 0 a 15%. En pendientes mayores a este, se encuentran bosques latifoliados.

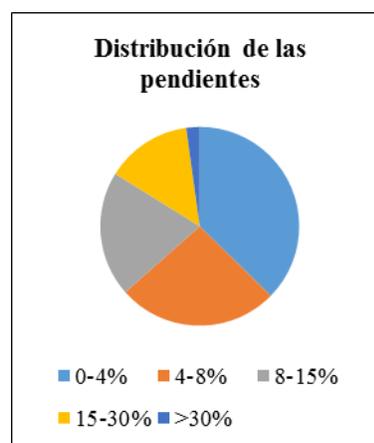


Figura 19. Distribución de las pendientes en las nueve UHs de la RACCS.

Cuadro 21. Subórdenes de suelos presentes en la nueve UHs de la RACCS.

Sub-orden	Superficie	
	km ²	%
Haplic Nitisol	14,423.27	59.30
Humic Nitisol	5,813.86	23.90
Eutric Gleysol	2,061.73	8.48
Haplic Phaeozem	910.29	3.74
Humic Cambisol	425.93	1.75
Eutric Regosol	305.23	1.25
Haplic Ferrasol	235.81	0.97
Eutric Fluvisol	98.99	0.41
Agua	33.44	0.14
Dystric Cambisol	10.39	0.04
Afloramiento rocoso	2.86	0.01
Vertic Luvisol	0.16	0.00
Total	24,321.94	100

Los Eutric Gleysols son suelos por lo general ocupados con humedales, sin embargo, en esta se observa mayoritariamente bosques latifoliados densos y áreas con fines agropecuarios, por lo que se supone que debieron ser drenados para ser utilizados con fines productivos.

En cuanto al uso de la tierra (Cuadro 22), en el año 2000, las actividades agropecuarias ocupaban 13,063.46 km² (53.71%) y los bosques latifoliados densos, 8,829.33 km² (36.30%). En un período de 15 años, el uso agropecuario aumentó 777.87 km² (3.26%); los bosques densos disminuyeron 760.38 km² (3.09%) y los bosques de pinos en 12.39 km² (0.06%). También se observa que las superficies de humedales se redujeron 311.02 km² (1.29%).

Cuadro 22. Cambios en el uso de la tierra en las nueve UHs de la RACCS. Años 2000 y 2015.

Uso de la tierra	Superficie			
	Año 2000		Año 2015	
	km ²	%	km ²	%
AG	13,063.46	53.71	13,841.33	56.97
TE	7.74	0.03	5.57	0.01
BLR	1,673.91	6.88	1,731.94	7.12
BLD	8,829.33	36.30	8,068.95	33.21
BPI	-	-	182.26	0.74
BPn	15.64	0.06	3.25	0.00
T	74.14	0.30	298.59	1.22
Tsv	-	-	2.81	0.00
A	135.82	0.56	113.18	0.45
M	19.28	0.08	4.67	0.01
H	375.69	1.54	64.67	0.25
TI	126.93	0.52	4.72	0.01
Total	24,321.94	100	24,321.94	100

AG: Agropecuario; TE: Tierra estéril; BLR: Bosque latifoliado raro; BLD: Bosque latifoliado denso; BPL: Bosque de palma; BPn: Bosque de pino; T: Tacotal; Tsv: Tierra sin vegetación; A: Agua; M: Manglar; H: Humedal; TI: Tierra inundada.

Unidades de respuesta hidrológica dominante

En la CH de la RACCN se delimitaron 432 subunidades, de las cuales en un período de 15 años (2000-2015) 145 presentaron un HRUD diferente. En el cuadro 23 se muestra que de las 145 subunidades con cambios, 44 subunidades principalmente ubicadas dentro de la reserva Indio Maíz presentaban usos agropecuarios en el año 2000, las cuales con el cambio del uso de la tierra, cambiaron su predominancia a bosques latifoliados densos en pendientes planas a ligeramente inclinadas en el año 2015 como HRUD.

Se presentó un efecto inversamente proporcional en las subunidades ubicadas en el norte de la CH, de modo que 43 cambiaron su dominancia de bosques densos a actividades agropecuarias, de las cuales 9 presentaron pendientes mayores al 8%. Las subunidades que presentaron humedales y tierras inundadas fueron sustituidas en el año 2015 por las actividades agropecuarias y bosques latifoliados densos principalmente, lo que indica que estos suelos debieron haber sido drenados para el desarrollo de estos usos de la tierra.

Cuadro 23. Cambios en las HRUD de las subunidades de la RACCS.

Año 2000		Año 2015		Cant.	Año 2000		Año 2015		Cant.
Uso	Pendiente	Uso	Pendiente		Uso	Pendiente	Uso	Pendiente	
AG	0-4%	BLD	0-4%	44	A	0-4%	AG	0-4%	1
BLR	0-4%	AG	0-4%	1	M	0-4%	BLD	0-4%	1
		BLD		11			AG		9
BLD	0-4%	AG	0-4%	31	H	0-4%	BLR	0-4%	1
		BPI		5			BLD		21
	4-8%		4-8%	3	TI	0-4%	AG		3
	8-15%	AG	8-15%	4			BLR	0-4%	1
15-30%	8-15%		4	BLD				4	
		15-30%		1					
Subtotal				104	Subtotal				41
Total									145

AG: Agropecuario; BLR: Bosque latifoliado ralo; BLD: Bosque latifoliado denso; BPI: Bosque de Palma; A: Agua; M: Manglar; H; Humedal; TI: Tierra inundada

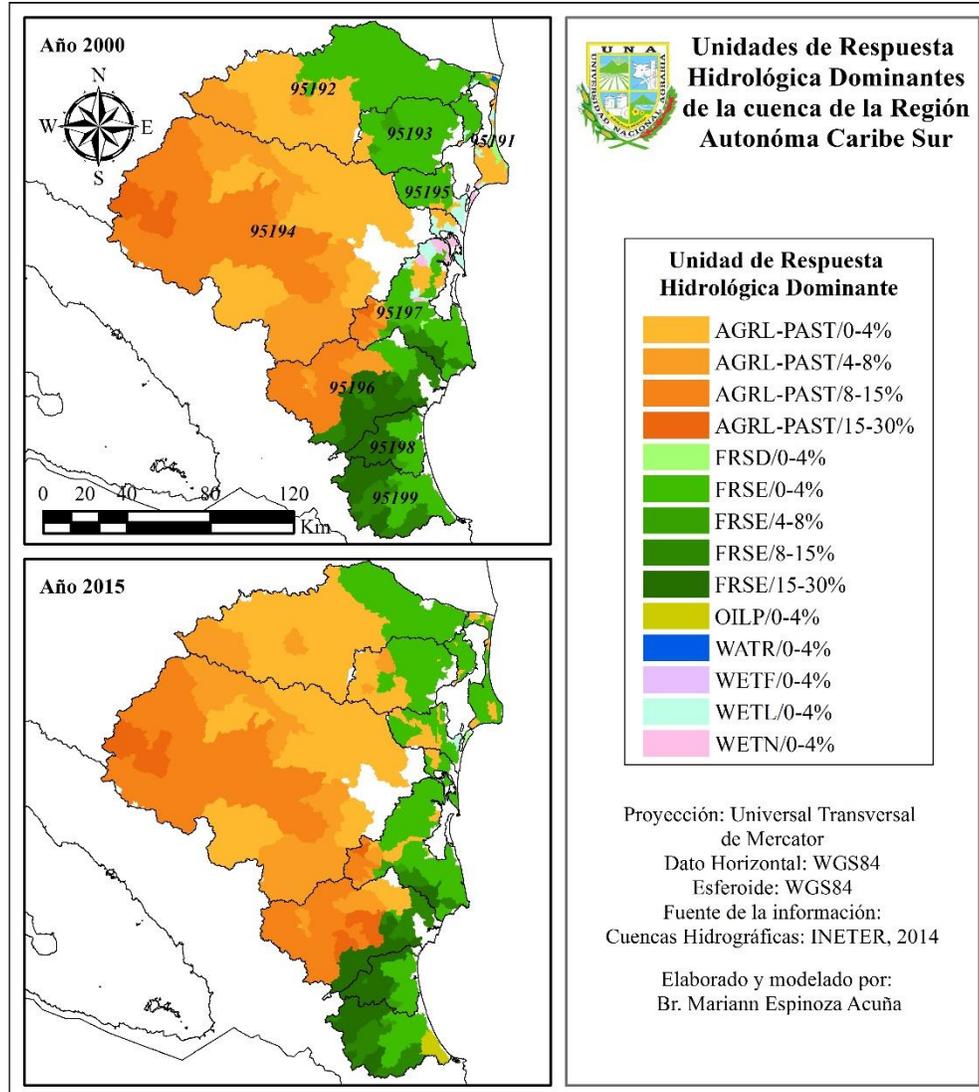


Figura 20. Unidades de respuesta hidrológica dominante de las nueve unidades hidrográficas de la RACCS.

4.2.6. Cuenca del Río San Juan

En la CH del Río San Juan se analizó 18,299.96 km² representando el 94.43% de la superficie total de la cuenca. De las 27 UHs que posee, 14 presentaron un comportamiento hidrológico deficitario, es decir en 13,653.6 km² (74.61%) se simuló con la propuesta de uso de la tierra (SAFs) para el año 2050.

Pendiente, tipo de suelo y uso de la tierra

Las 13 UHs que aportan al caudal (ver Figura 21.), presentan mayoritariamente extensiones con pendientes que varían de 0 a 4%, ocupando 2,116.12 km² (38.15%); seguido de las pendientes de 4-8% con 1,290.37 km² (23.26%). Cuenta con 925.89 km² (16.69%) de superficie con pendientes mayores de 15%, sin embargo, solo 104.69 km² (1.88%) esta representado por pendientes mayores al 30%, característica que las beneficia al ser UHs que no se encuentran fuertemente sometidas a la degradación del suelo por erosión.

Las actividades agropecuarias se desarrollan mayoritariamente en pendientes planas a ligeramente inclinadas (0-4%), y en menor dimensión en pendientes mayores al 8%. En todas las gradientes de pendientes se presencia el dominio de los bosques latifoliados densos.

Las pendientes dominantes en las UHs deficitarias son las planas a ligeramente inclinadas (0-4%). En el Figura 22 se puede observar una distribución casi homogénea entre las demás clases de pendientes.

En 3,830.43 km² (30.03%) de la superficie total presenta pendientes mayores al 15% y de estas 1,398.33 km² (10.96%) presenta pendientes mayores a 30%. Por lo que las convierte en áreas vulnerables ante la degradación por erosión que presentan estas UHs en comparación con las unidades que aportan.

Las UHs de la cuenca del Río San Juan cuentan con una variedad de suelos (ver Cuadro 24.). Las UHs que aportan al caudal presenta al Haplic Nitisol como el suborden predominante, con 1854.80 km² (33.44%), seguido del Haplic Phaeozems con 870 km² (15.69%) y el Eutric Vertisols con 156.5 km² (11.49%)

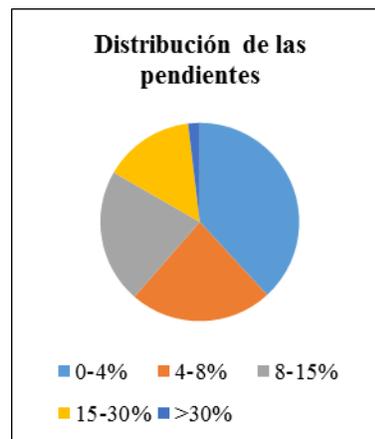


Figura 21. Distribución de las pendientes en las 13 UHs que

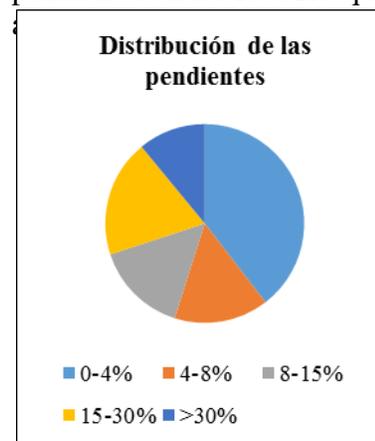


Figura 22. Distribución de las pendientes en las 14 UHs deficitarias del Río San Juan.

Cuadro 24. Subórdenes de suelos presentes en las 27 UHs del Rio San Juan

Sub-orden	Superficie			
	UHs que aportan		UHs deficitarias	
	km ²	%	km ²	%
Haplic Phaeozem	870.00	15.69	4,201.46	32.94
Eutric Regosol	332.59	6.00	2,989.99	23.44
Eutric Vertisol	637.39	11.49	2,483.54	19.47
Vertic Luvisol	156.50	2.82	1,018.91	7.99
Dystric Cambisol	237.20	4.28	910.69	7.14
Humic Nitisol	448.10	8.08	410.61	3.22
Mollic Andosol	-	-	297.04	2.33
Vitric Andosol	-	-	214.35	1.68
Eutric Gleysol	197.73	3.56	96.38	0.76
Haplic Ferrasol	337.25	6.08	-	-
Afloramiento rocoso	-	-	45.44	0.36
Haplic Nitisol	1854.80	33.44	35.45	0.28
Agua	25.25	0.46	22.52	0.18
Humic Cambisol	99.55	1.79	19.21	0.15
Eutric Fluvisol	225.47	4.07	7.79	0.06
Terric Histosol	124.76	2.25	-	-
Total	5,546.60	100	12,753.37	100

A pesar de ser los Phaeozem los suelos ricos en materia orgánica, y con propiedades idóneas para los cultivos; los suelos Haplic Nitisol son los que se encuentran utilizados mayormente con dicha finalidad, en pendientes de 0 a 15%. Aunado a ello, estos suelos son los que presentan mayor cobertura forestal. En cuanto a los Eutric Vertisol, por sus propiedades vérticas, están confinadas a fines pecuarios principalmente.

En las UHs deficitarias, los subórdenes más dominantes son los Haplic Phaeozem, con 4,201.46 km² (32.94% de las superficie de estas unidades); seguido de Eutric Regosol y Eutric Vertisol, con 2989.99 km² (23.44%) y 2483.54 km² (19.47%), respectivamente.

De estos, los Vertisol y Phaeozem son los que se encuentra ocupados por actividades pecuarias y agrícolas. Los Phaeozem se encuentran ampliamente utilizados en cualquier rango de pendiente, principalmente de 0 a 4%, mientras que los Eutric Vertisol se encuentran mayoritariamente en pendientes de 0 a 8% por lo que las actividades pecuarias predominan en este, siendo principalmente afectado por la compactación del suelo debido al sobrepastoreo. Los Eutric Regosol también se encuentran ocupado con actividades agrícolas en pendientes planas, sin embargo es más dominante la presencia de tacotales en pendientes planas y moderadamente escarpadas (0 a 30%)

En un lapso de 15 años (Cuadro 25.) las superficies de bosques latifoliados denso disminuyeron 579.21 km² (10.44%) y las áreas agropecuarias aumentaron 552.87 km² (9.97 %) en las UHs que aportan agua al caudal, propiciándose el aumento del escurrimiento debido a la compactación de los suelos producto del sobrepastoreo.

Es posible que 552.87 km² bosques latifoliados densos hayan sido reemplazados por dicha actividad económica y 26.33 km² convertidos en bosques latifoliados ralos. Si bien, estas unidades se encuentran ocupadas principalmente por la ganadería y agricultura, su distribución de las pendientes en conjunto con las precipitaciones anuales, garantizan que dichas UHs presenten un comportamiento hidrológico de aporte a los recursos hídricos.

Cuadro 25. Cambios en el uso de la tierra en las 27 UHs deficitarias en la cuenca Río San Juan. Años 2000, 2015 y 2050 con Recomendaciones.

Uso de la tierra	Superficie				Superficie					
	UHs que aportan				UHs deficitarias					
	Año 2000		Año 2015		Año 2000		Año 2015		Año 2050	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%
AG	3,068.35	55.32	3,621.22	65.29	7,665.23	60.10	7,657.02	60.04	6,184.24	48.49
TE	46.82	0.84	15.91	0.29	193.13	1.51	94.60	0.74	94.60	0.74
C	-	-	-	-	-	-	166.72	1.31	166.72	1.31
BLR	248.52	4.48	155.54	2.80	485.92	3.81	2,068.80	16.22	2,068.80	16.22
BLD	1,981.36	35.72	1,402.15	25.28	188.40	1.48	234.20	1.84	234.20	1.84
PF/SAF	-	-	5.51	0.10	-	-	45.57	0.36	1,518.35	11.91
BPI	0.37	0.01	135.89	2.45	-	-	-	-	-	-
BPn	-	-	-	-	22.63	0.18	84.13	0.66	84.13	0.66
T	95.03	1.71	128.52	2.32	4,037.89	31.66	2,281.48	17.89	2,281.48	17.89
A	24.75	0.45	24.22	0.44	44.11	0.35	77.20	0.61	77.20	0.61
M	-	-	-	-	4.16	0.03	2.45	0.02	2.45	0.02
H	80.92	1.46	57.46	1.04	109.48	0.86	41.19	0.32	41.19	0.32
TI	0.48	0.01	0.18	0.00	2.43	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00
Total	5,546.60	100	5,546.60	100	12,753.37	100	12,753.37	100	12,753.37	100

AG: Agropecuario; TE: Tierra estéril; C: Cafetal; BLR: Bosque latifoliado ralo; BLD: Bosque latifoliado denso; PF: Plantación Forestal; SAF: Sistema agroforestal; BPI: Bosque de Palma; BPn: Bosque de Pino; T: Tacotal; A: Agua; M: Manglar; H: Humedal; TI: Tierra inundada.

Los cambios de uso de la tierra en las UHs deficitarias no son muy notables en cuanto a las superficies destinadas a actividades agropecuarias, las cuales solo se redujeron 8.21 km² (0.06%). También se observó una disminución significativa de 1,756.41 km² (13.77%) en las áreas de tacotales; y una ligera disminución de 45.8 km² (0.35%) en los bosques latifoliados densos. Esto está directamente relacionado con el aumento de 1582.88 km² (12.41%) en las superficies de bosques latifoliados ralos en el mismo período. La caficultura representa 166.72 km² (1.3%) de la superficie de estas UHs en el año 2015, el cual no se registraba en el año 2000.

Con la recomendación propuesta en pendientes mayores al 15%, se espera reducir 1518.35 km² (11.56%) de las superficies con fines agropecuarios por SAFs.

Unidades de respuesta hidrológica dominante

En la CH del Río San Juan con la propuesta de uso para el año 2050 se obtuvo que 109 subunidades de las 645 delimitadas en las UHs deficitarias, cambiaron su HRUD en comparación al año 2015.

En el cuadro 26 se muestra que de las 109 subunidades con cambios en su HRUD, 67 pasaron de presentar un uso agropecuario en pendiente mayor a 15% a ser subunidades con SAFs. Las restantes adoptaron los bosques latifoliados ralos y tacotales como uso predominante a influencia de la reducción de la superficie ocupada por las actividades agropecuarias. Solo en una subunidad se sustituyó la agricultura, por pinares en pendientes de 15 a 30%.

Cuadro 26. Cambios en las HRUD de las subunidades del Río San Juan

Año 2015		Año 2050		Cant.
Uso	Pendiente	Uso	Pendiente	
AG	0-4%	C	0-4%	1
		BLR		4
		SAF		2
		T		2
	4-8%		4-8%	1
	8-15%	BLD	8-15%	1
	15-30%			16
		SAF	15-30%	40
		BPn		1
		T		9
		SAF		1
	T	1		
>30%	BLD	>30%	2	
	SAF		23	
BLR	15-30%		0-4%	1
		T	15-30%	1
			>30%	1
T	15-30%	BLD	15-30%	1
		SAF		1
Total				109

Los cambios por SAFs en pendientes mayores al 15% se encuentran principalmente en los municipios Malpaisaillo, El Jicaral, San Francisco Libre, el norte de San Lorenzo, el oeste de Camoapa, el norte de Juigalpa, el este de Acoyapa, Belén, Potosí y en las laderas del Volcán Maderas en Altagracia.

AG: Agropecuario; C: Cafetal; BLR: Bosque latifoliado ralo; BLD: Bosque latifoliado denso; SAF: Sistema agroforestal; BPn: Bosque de Pino; T: Tacotal.

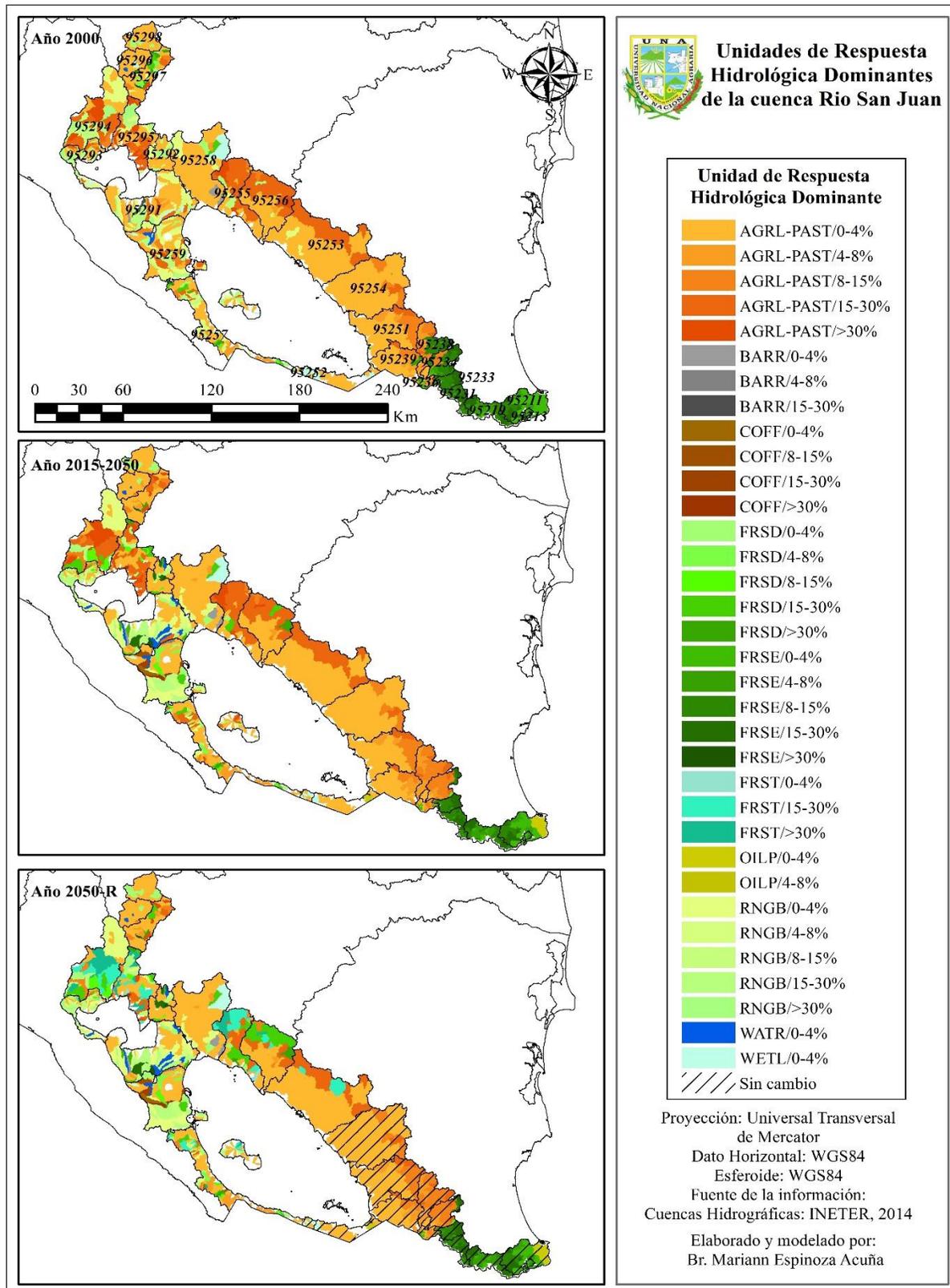


Figura 23. Unidades de respuesta hidrológica de las 27 unidades hidrográficas del Río San Juan.

4.2.7. Cuenca del Pacífico

En la CH del Pacífico se analizó 10,748.41 km² representando el 88.11% de la superficie total de la cuenca. Las tres UHs presentaron un comportamiento hidrológico deficitario, por ello se simuló en todas ellas la propuesta de uso de la tierra (SAFs), para el año 2050.

Pendiente, subórdenes de suelo y uso de la tierra

La cuenca del Pacífico tiene 4,557.99 km² (42.41% de la superficie analizada) en pendientes planas a ligeramente inclinadas (0 a 4%), favoreciendo el uso agropecuario, en estas áreas.

En 2,697.66 km² (25.09%) se presentan pendientes de moderadamente escarpadas a muy escarpadas (>15%). De esta superficie se encuentra aproximadamente 114.47 km² destinados a la agricultura y ganadería.

En el Cuadro 27, se muestran los subórdenes de suelos representativos en la cuenca. Los que tiene mayor área son los Haplic Phaeozem (26.8%), seguido de los Eutric Regosol, Mollic Andosol, Vertic Luvisol y Eutric Vertisol. Los que tiene menor área son los Haplic y Humic Nitisol con 0.7% y 0.5%, respectivamente.

Los Haplic Phaeozem, son característicos de suelos ricos en materia orgánica, por lo que están principalmente ocupados con usos agropecuarios en pendientes planas a ligeramente inclinada. Sin embargo, presentan áreas (53.74 km²), con este uso en pendientes mayores al 15%, que lo hacen susceptible a las pérdidas de suelo por erosión.

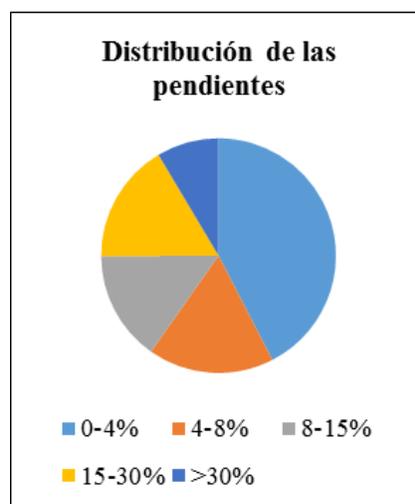


Figura 24. Distribución de las pendientes de las tres UHs deficitarias del Pacífico.

Cuadro 27. Subórdenes de suelos presentes en las tres UHs del Pacífico

Sub-orden	Superficie	
	km ²	%
Haplic Phaeozem	2,885.94	26.8
Eutric Regosol	1,736.90	16.2
Mollic Andosol	1,717.96	16.0
Vertic Luvisol	1,542.29	14.3
Eutric Vertisol	1,123.53	10.5
Eutric Gleysol	703.81	6.5
Vitric Andosol	610.64	5.7
Dystric Cambisol	206.30	1.9
Haplic Nitisol	100.37	0.9
Humic Nitisol	71.16	0.7
Afloramiento rocoso	49.52	0.5
Total	10,748.41	100

Los Eutric Regosol se encuentran ocupados con usos agropecuarios y tacotales en pendientes de 0 a 4%. En áreas fuertemente inclinadas predominan los bosques latifoliados ralos, mientras que en pendientes moderadas a muy escarpadas están ocupadas con uso agrícola y pecuaria, estas ocupan una superficie de 23.08 km². Por ser suelos minerales jóvenes, muy débiles y de lenta formación, estos se encuentran altamente a la pérdida de los suelos por erosión.

Los Mollic Andosol por ser suelos negros de origen volcánicos, con buenas propiedades de enraizamiento y almacenamiento de agua, se encuentran utilizados con usos agropecuarios en pendientes de 0 a 4%. Las áreas con actividad agropecuaria en pendientes mayores al 15% solo se encuentran en 2.09 km². En pendientes mayores al 8% es más frecuente encontrar bosques latifoliados ralos.

Los Vertic Luvisol son suelos que tienen mayor contenido de arcilla con propiedades vérticas en el subsuelo que en el suelo superficial, se encuentran principalmente ocupados por bosques latifoliados ralos. Se desarrolla agricultura y ganadería en pendientes mayores al 15%, en un área de 23.02 km².

En cuanto al cambio del uso de la tierra en el período 2000-2015 (Cuadro 28.) no se observan grandes diferencias en cuanto a las superficies agropecuarias, sin embargo existen otros usos que han aumentado o disminuido sus superficies de manera notable en un lapso de 15 años. El uso agropecuario ocupaba 6,151.58 km² (57.23%) de la superficie total analizada, el cual para el año 2015 se redujo 164.81 km² (1.53%), haciendo suponer que en esta áreas no se dio continuidad a las actividades agropecuarias, por lo que para el año 2015 representan superficies de bosque latifoliado ralo, los cuales pasaron 617.08 km² de superficie ocupada a 1789.80 km², en un período de 15 años.

Las superficies de los tacotales se redujeron 1,384.7 km² (12.88%); y los bosques latifoliados ralo aumentaron 1171.71 km² (10.91%), haciendo indicar que reducción de las superficies de tacotales puede ser debido a la sucesión vegetal a bosques latifoliados; aunado con el aumento de las superficies de bosques latifoliados densos, los cuales pasaron de 82.94 km² a 397.46 km² (2.93% de aumento). También se observa un incremento de 24.98 km² (0.23%) en la superficies de pinos el para el año 2015; pasando de 75.29 km² a 100.28 km²

Las superficies ocupadas por humedales, manglares y tierras inundadas disminuyeron 76.06 km², es decir 0.70% del área total analizada. En el año 2015 se registraron usos que en el año 2000 no se identificaron como los cafetales y las plantaciones forestales los cuales ocupan un área de 98.6 km² (0.92%).

Cuadro 28. Cambios en el uso de la tierra en las tres UHs del Pacífico. Años 2000, 2015, y 2050 con recomendaciones.

Uso de la tierra	Superficie					
	Año 2000		Año 2015		Año 2050-R	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
AG	6,151.58	57.23	5,986.77	55.70	4,898.64	45.58
TE	78.30	0.73	28.16	0.26	27.77	0.26
C	-	-	70.13	0.65	70.35	0.65
BLR	617.08	5.74	1,789.80	16.65	1,789.09	16.65
BLD	82.94	0.77	397.46	3.70	387.05	3.60
PF/SAF	-	-	28.47	0.26	1,147.15	10.67
BPn	75.29	0.70	100.28	0.93	98.74	0.92
T	3,233.39	30.08	1,848.69	17.20	1,831.22	17.04
A	25.68	0.24	90.58	0.84	90.11	0.84
M	224.15	2.09	233.37	2.17	234.03	2.18
H	259.93	2.42	174.68	1.63	174.24	1.62
TI	0.06	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00
Total	10,748.41	100	10,748.41	100	10,748.41	100

R: Año con propuesta de uso; AG: Agropecuario; TE: Tierra estéril; C: Cafetal; BLR: Bosque latifoliado ralo; BLD: Bosque latifoliado denso; PF: Plantación Forestal; SAF: Sistema agroforestal; BPn: Bosque de Pino; T: Tacotal; A: Agua; M: Manglar; H: Humedal; TI: Tierra inundada.

Unidades de respuesta hidrológica dominante

En la CH del Pacífico con la propuesta de uso para el año 2050 se obtuvo que 29 subunidades de las 318 delimitadas, cambiaron su HRUD en comparación al año 2015. En las 289 subunidades restantes no se observaron modificaciones, debido a que en esta cuenca las actividades agropecuarias se desarrollan principalmente en pendientes menores al 8%.

En el cuadro 29 se muestra que de las 29 subunidades con cambios en su HRUD, 18 pasaron de presentar un uso agropecuario en pendiente mayor a 15% a ser subunidades con SAFs. Las restantes subunidades (11) para el año 2050 presentaron los bosques latifoliados ralos y tacotales como uso dominante.

Los cambios por SAFs en pendientes mayores al 15% se encuentran en los municipios de San Juan de Limay; San José de Cusmapa San Francisco del Norte, San Pedro del Norte, Santa María, Santa Teresa y parte de la Conquista y Jinotepe, y el suroeste de Nandaime.

Cuadro 29. Cambios de HRUD de las subunidades del Pacífico.

Año 2015		Año 2050-R		Cant.
Uso	Pendiente	Uso	Pendiente	
AG	15-30%	BLR		7
		SAF	15-30%	10
		T		3
	> 30%	BLR		1
		SAF	>30%	7
T	15-30%	SAF	15-30%	1
Total				29

R: Año con propuesta de uso; AG: Agropecuario; BLR: Bosque latifoliado ralo ;T:Tacotal; PF: Plantación forestal; SAF: Sistema Agroforestal.

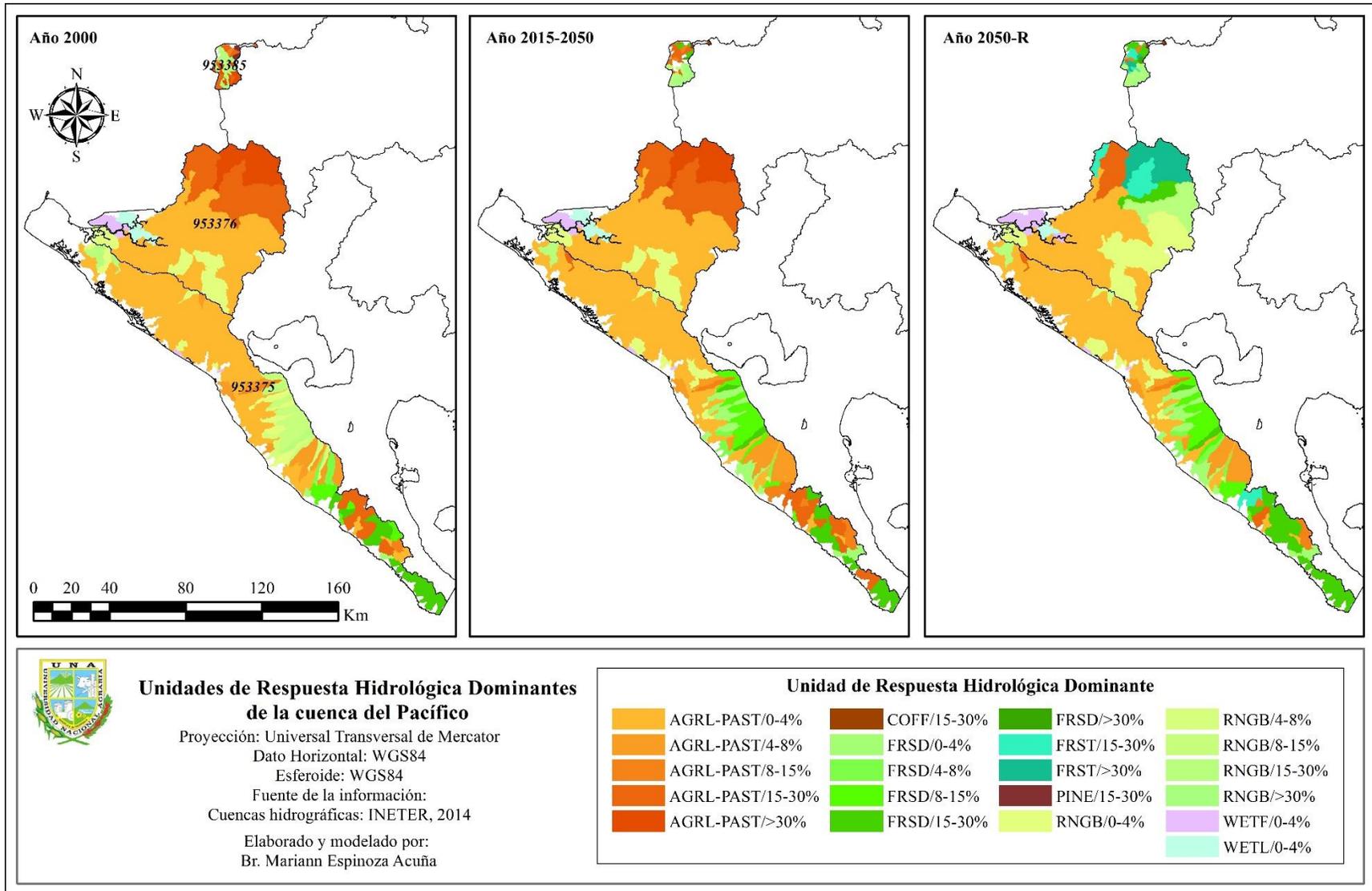


Figura 25. Unidades de respuesta hidrológica dominante de las tres unidades hidrográficas del Pacífico

4.3. Impactos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos

Las 29 UHs que clasificaron como deficitarias por presentar precipitaciones menores a su evapotranspiración potencial ($P-ETP < 0$) (ver Cuadro 30), corresponden a los departamentos de la regiones del Pacífico, Norcentral y Central, a excepción del departamento Río San Juan, y el costado este de Chontales. Las UHs más deficitarias son las que coinciden con el corredor seco, siendo estas las UHs con los códigos 953385 con 611 mm, seguida de la 95168 con 600.9 mm, 951969 con 595.7 mm y 95166 con 591.3 mm de déficit de agua.

Cuadro 30. Unidades hidrográficas deficitarias de Nicaragua según su precipitación y evapotranspiración.

UH	P-ETP		UH	P-ETP		UH	P-ETP	
	2015	2050		2015	2050		2015	2050
953385	-611	-670.7	95255	-320.7	-261.1	95297	-122.9	-61.8
95168	-600.9	-521.2	95298	-314.7	-161	953375	-100.9	192.7*
95169	-595.7	-647.5	95295	-294.1	-332.2	95294	-69.8	-243.3
95166	-591.3	-670.7	95186	-254.9	-182.5	95184	-68.5	76.6*
95291	-429.4	-85.9	95258	-239.5	-109.7	95257	-57.8	135.5*
95292	-407.5	-340.4	95164	-170.8	-4.4	95189	-16.5	-23.5
95167	-374.7	-287.2	95296	-164.6	20.6*	95188	-13.3	101.8*
95165	-345.2	-279.7	953376	-147.5	138.4*	95187	-8.7	105.5*
95256	-344	-288.5	95293	-143.4	-54.1	95185	-5.1	108.4*
95253	-341.8	-286.8	95259	-137.1	66.1*			

P: Precipitaciones; ETP: Evapotranspiración Potencial; UH: Unidad Hidrográfica

* Con cambios en su respuesta hidrológica

La tendencia del comportamiento hidrológico de las UHs para el año 2050 con el escenario pesimista, indica una disminución en el aporte al caudal de los cuerpos de agua, sin embargo nueve de las unidades identificadas como deficitarias en el año 2015, cambiaron su comportamiento para el año 2050, clasificándose como unidades que aportan. Entre estas unidades con comportamiento hidrológico cambiante destacan las aledañas a las UHs a las RACCS y RACCN, influenciado por el aumento de las precipitaciones en estas regiones.

En el caso de la CH del Pacífico, el cambio del comportamiento se asocia al nivel seleccionado para el análisis, debido a que a pesar de que se realizó con un nivel más específico (nivel 6), aún las UHs presentaban tamaños que generalizaba la distribución de las precipitaciones induciendo a presentar una respuesta hidrológica de aporte al caudal.

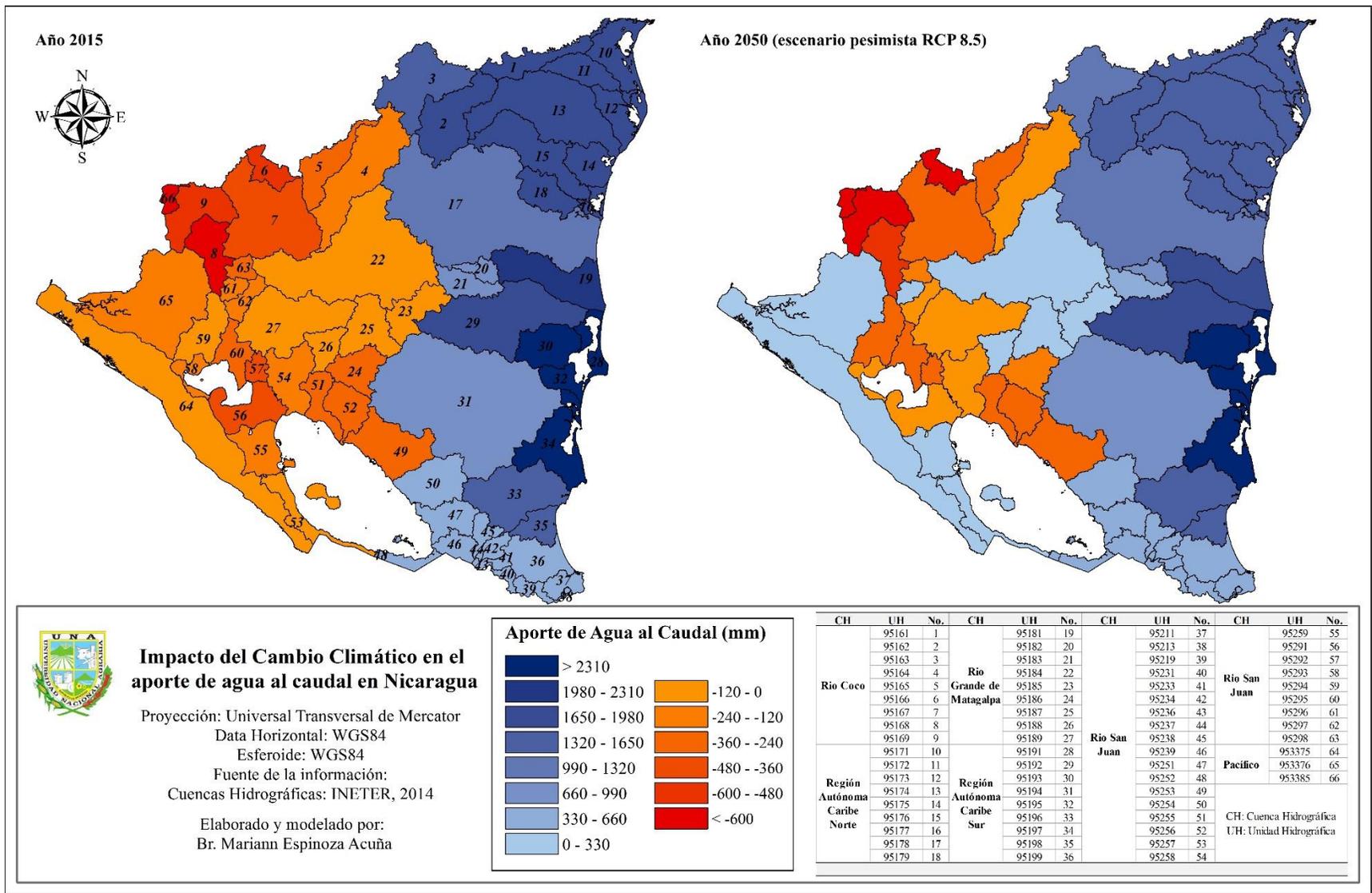


Figura 26. Aporte de agua al caudal de las unidades hidrográficas de Nicaragua

4.3.1. Influencia en el escurrimiento superficial

Los aumentos de las intensidades de las precipitaciones y la disminución de su frecuencia y duración, han contribuido al incremento del escurrimiento superficial, y por consiguiente a la pérdida de suelos por erosión hídrica, lo que afecta a la profundidad efectiva de los suelo y por tanto a la capacidad productiva de los mismo debido a la sobreutilización.

El escurrimiento superficial (ver Cuadro 31) en las UHs deficitarias para el año 2015 varió de 65.5 a 497.9 mm. En el año 2050, con el escenario climático pesimista se espera que estas cifras aumenten, variando de 70.76 a 689.76 mm.

Cuadro 31. Escurrimiento superficial en las unidades hidrográficas deficitarias de Nicaragua

CH	UH	Escurrimiento superficial (mm/año)			CH	UH	Escurrimiento superficial (mm/año)		
		2015	2050	2050-R			2015	2050	2050-R
PC	953375	446.61	660.42	644.28	RSJ	95253	300.28	428.61	414
	953376	404.37	606.64	580.29		95255	321.2	461.44	348.86
	953385	104.53	70.76	36.57		95256	255.19	373.31	318.59
Media	318.50	445.94	420.38	95257		497.9	689.76	683.9	
S	186.51	326.03	333.93	95258		276.12	456.88	361.07	
RC	95164	189.44	302.98	209.21		95259	363.5	540.54	530.11
	95165	171.19	242.86	135.3		95291	272.43	556.1	547.1
	95166	155.82	162.39	79.08		95292	150.96	243.53	243.53
	95167	224.3	343.39	199.13		95293	269.72	278.22	275.98
	95168	112.51	198.22	141.97		95294	347.87	332.01	311.03
	95169	65.5	73.09	44.58		95295	158.81	237.54	235.82
Media	153.13	220.49	134.88	95296		237.68	395.24	208.59	
S	56.65	97.99	64.76	95297		213.4	327.98	239.5	
RGM	95184	349.26	526.87	418.34	95298	244.6	410.28	333.13	
	95185	344.03	502.31	407.61	Media	279.26	409.39	360.80	
	95186	293.65	422.57	317.32	S	88.04	127.41	138.73	
	95187	368.27	531.43	363.81	Media global	268.35	389.96	319.68	
	95188	346.4	502.01	340.07	S global	104.38	160.95	166.19	
	95189	296.49	431.36	302.01					
Media	333.02	486.09	358.19						
S	30.63	47.47	47.43						

R: Año con propuesta de uso; CH: Cuenca hidrográfica; UH: Unidad Hidrográfica; S: Desviación estándar.

De manera general, se observa que del año 2015 al 2050 hay un incremento medio de la escorrentía de 121.61 mm; siendo las UHs que registraron los mayores incrementos las UHs 95291 con 283.67 mm, 953375 con 213.81 mm, 953376 con 202.27 mm y 95257 con 191.86 mm, correspondientes a las cuenca del Pacífico y Río San Juan.

Las UHs ubicadas parcial o totalmente dentro del corredor seco o cercano a él, son las que presentan los menores valores en cuanto a esta variable, debido a la disminución de las precipitaciones anuales obtenidas con el escenario pesimista. Se observó que las UHs 953385 y 95294 fueron las únicas que en el período 2015-2050 presentaron una disminución del escurrimiento de 33.77 mm y 15.86 mm, respectivamente. Esto, además de estar asociado con su posición geográfica que contribuye a que la distribución de las precipitaciones no sea regulares, también está relacionado con la capacidad de infiltración de los suelos dominantes de las unidades, siendo estos los Eutric Regosols y Haplic Phaeozems, los cuales presentan textura franco limosa a franco arenosa.

Con los SAFs como cambio del uso de la tierra en todas la UHs deficitarias el escurrimiento en las unidades variará de 36.57 mm a 683.9 mm al año; se espera reducir la escorrentía como promedio 70.27 mm, comparado con los resultados para el año 2050 sin el cambio del uso de la tierra del año 2015. Las UHs que presentan reducciones significativas en las escorrentías son la 95296 con 186.65 mm, 95187 con 167.62 mm, 95188 con 161.94 mm y 95167 con 144.26 mm, en relación a los resultados obtenidos para el año 2050 con el mismo uso de la tierra del año 2015.

Las UHs 95257, 953375, 953376, 95291 y 95259, fueron las que presentaron menos reducción en escurrimiento con la propuesta de uso (SAFs), debido a que estas unidades presentan menos del 15% de su superficie utilizada con usos agropecuarios en pendientes mayores al 15%.

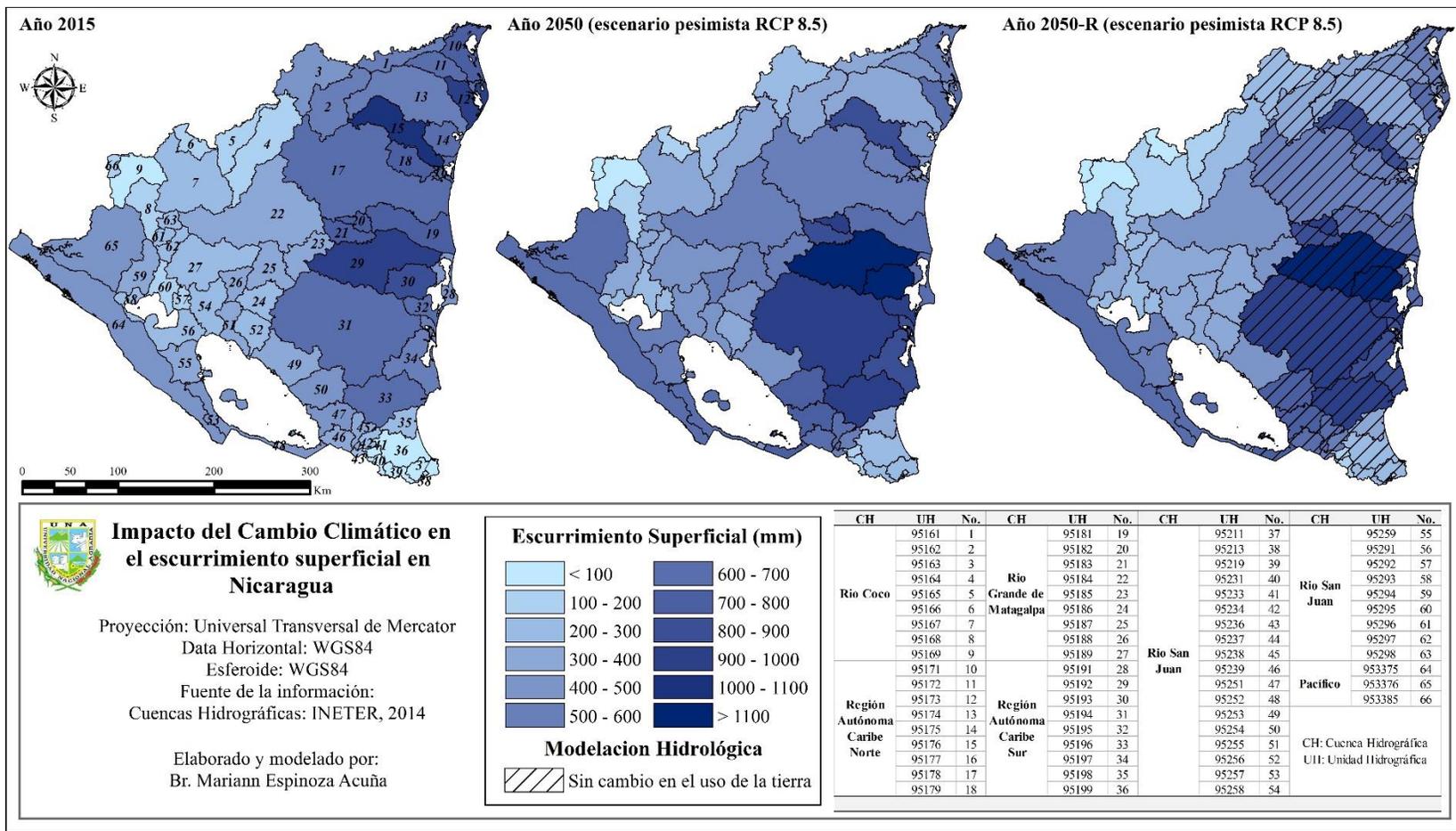


Figura 27. Influencia del cambio climático en el escurrimiento superficial en las unidades hidrográficas de Nicaragua.

4.3.2. Influencia en la carga de sedimentos

En cuanto a la carga de sedimentos a los cuerpos de agua en las UHs deficitarias (ver Cuadro 32), se obtuvieron datos que variaban de 12.5 a 151.56 toneladas por hectárea (ton/ha) para el año 2015. En este año el 34.48% (10) de las UHs presentaron pérdidas de suelos moderadas, el 41.37% (12) pérdidas altas y el 13.79% (4) pérdidas muy altas.

Cuadro 32. Carga de sedimentos en las unidades hidrográficas deficitarias de Nicaragua

CH	UH	Carga de sedimentos (ton/ha)			CH	UH	Carga de sedimentos (ton/ha)		
		2015	2050	2050-R			2015	2050	2050-R
PC	953375	43.26	63.22	39.74	RSJ	95253	41.11	59.27	55.44
	953376	49.06	74.76	58.71		95255	151.56	225.19	63.18
	953385	27.63	19.85	6.4		95256	78.33	109.74	66.01
Media	39.98	52.61	34.95	95257		78.33	60.97	90.43	
S	11.08	28.95	26.48	95258		60.97	69.51	118.32	
RC	95164	34.03	57.83	5.82		95259	35.54	57.86	46.34
	95165	72.44	113.59	0.41		95291	12.5	30.16	27.61
	95166	82.21	84.45	8.51		95292	17.77	27.51	27.51
	95167	62.21	98.8	16.55		95293	35.76	30.88	30.17
	95168	30.35	56.32	28.18		95294	50.67	72.33	32.03
	95169	20.61	21.84	5.73		95295	34.06	56.05	59.98
Media	50.31	72.14	10.87	95296		34.06	124.8	234.49	
S	25.28	33.36	9.99	95297	124.8	37.54	68.53		
RG	95184	51.42	80.95	19.04	95298	112.16	209.78	121.01	
	95185	63.54	98.61	47.82	Media	61.59	99.32	51.79	
	95186	80.59	120.54	54	S	41.64	72.52	26.69	
	95187	58.67	89.51	23.98	Media global	59.80	92.21	38.67	
	95188	135.73	209.31	47.15	S global	34.86	59.20	26.23	
M	95189	60.11	93.97	34.4					
	Media	75.01	115.48	37.73					
S	31.29	47.84	14.18						

R: Año con propuesta de uso; CH: Cuenca hidrográfica; UH: Unidad Hidrográfica; S: Desviación estándar

Para el año 2050 con el escenario pesimista y el uso de la tierra del año 2015, se obtuvo un aumento, variando de 19.85 a 225.19 ton/ha. Con el incremento de las intensidades de las precipitaciones para este año, se obtuvo que el 55.17% (16) de las UHs presentarán pérdidas altas y el 27.59% (8) muy altas (ver Figura 28). En el año 2015 como en el 2050 sin la propuesta de uso, ninguna de las UHs presentó pérdida de suelos ligera (0-25 ton/ha).

De manera general, se observa que del año 2015 al 2050 hay un incremento medio en la carga de sedimentos de 32.41 ton/ha, siendo las UHs que registraron los mayores aumentos las 95296 con 109.60 ton/ha, la 95298 con 97.62 ton /ha, 95255 con 73.63 ton/ha y 95188 con 73.58 ton/ha; las cuales corresponden a las cuencas de Río San Juan y Río Grande de Matagalpa. Aunado a esto, se observa la disminución de pérdida de suelo en dos UHs, 95293 y 953385 con 4.88 ton/ha y 7.78 ton/ha menos en relación al año 2015, respectivamente.

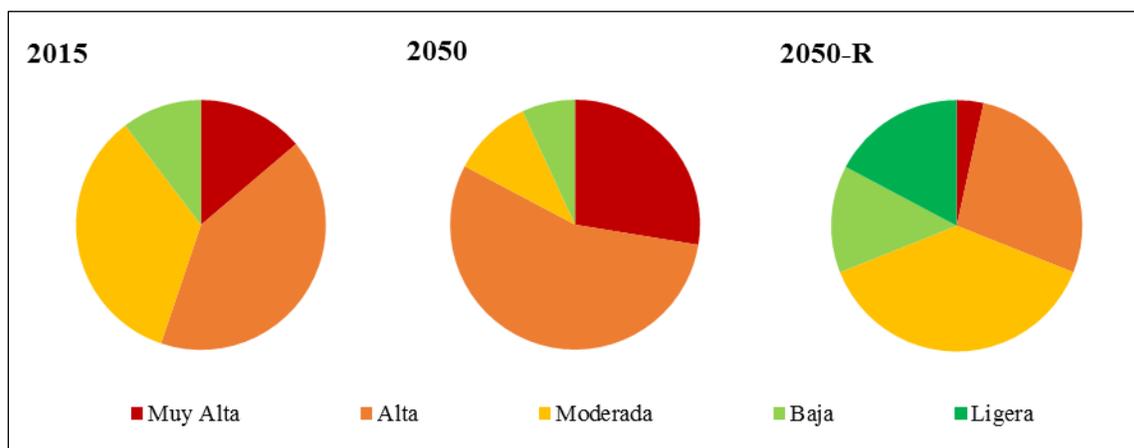


Figura 28. Cambios en las pérdidas de suelos de las unidades hidrográficas deficitarias. Año 2015, 2050 y 2050 con recomendaciones

Con la propuesta de uso se espera reducir las 8 UHs con pérdidas muy altas en el año 2050 con el uso de la tierra del 2015, a una unidad; y las 16 UHs con pérdidas altas a 8 unidades. Con los SAFs se estima una disminución media de la sedimentación de 21.12 ton/ha en comparación a los resultados obtenidos para el mismo año sin la propuesta.

Las UHs que presentaron las mayores disminuciones por influencia del cambio del uso de la tierra en pendientes mayores al 15% fueron la UH 95296 con 213.14 ton/ha, seguido de las unidades 95188 con 162.16 ton/ha, 95255 con 162.01 ton/ha, y 95165 con, 113.18 ton/ha menos en relación con los resultados generados modelación del año 2050 con el uso la tierra 2015.

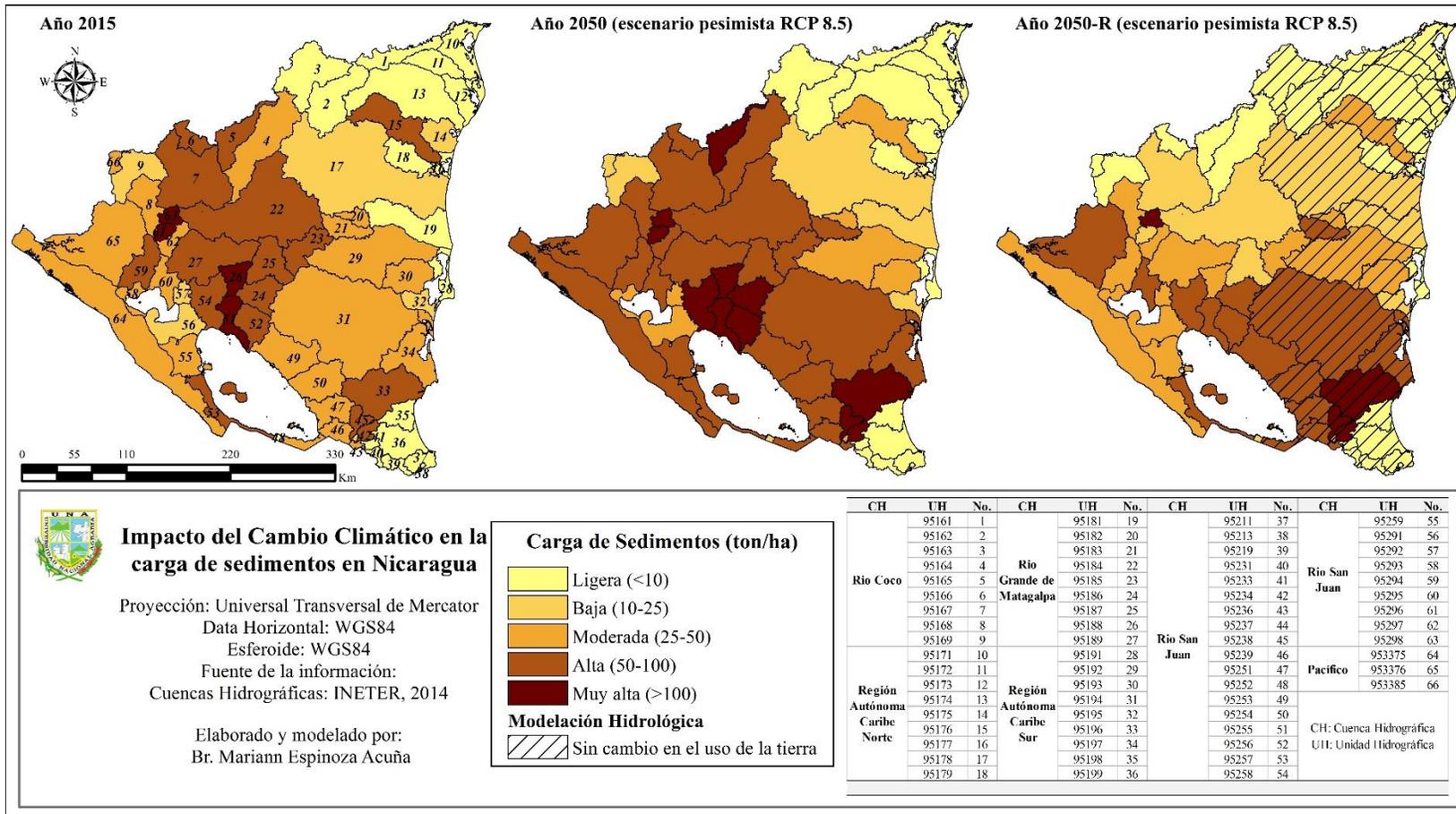


Figura 29. Influencia del cambio climático en la carga de sedimentos en las unidades hidrográficas de Nicaragua.

Es relevante observar que si bien la unidad del río Punta Gorda (95196) de la CH de la RACS y; las UHs del río Santa Cruz 95234 y Sábalo (95238) de la CH del río San Juan clasificaron como unidades que aportan, las pérdidas de suelos resultan muy altas mediante la simulación con el escenario climático pesimista, a pesar de no poseer grandes extensiones de pendientes escarpadas, estas unidades cuentan con una predominancia marcada de la actividad agricultura en su superficie, induciendo directamente a esta clase de pérdida de suelos (muy alta) y a altos niveles de escurrimiento superficial, por consiguiente convirtiéndolas más vulnerable ante inundaciones, de modo que el manejo de estas resulta de prioridad.

Asimismo, durante el análisis del escurrimiento y la carga de sedimentos, las variaciones en la UH 95292 resultaron nulas. Esto debido a que las áreas destinadas a ser sustituidas se encuentran en sub-ordenes de suelos que presentan cierto grado de resistencia ante la erosión hídrica, por su textura arcillosa; siendo estos Eutric Vertisol, Vertic Luvisol y Dystric Cambisol.

4.3.3. Prioridad de manejo de las unidades hidrográficas deficitarias

A continuación se presenta el grado de prioridad de manejo de las UHs deficitarias (ver Cuadro 33) considerando las variaciones en cuanto a las cargas de sedimentos y el escurrimiento superficial de los períodos correspondientes a los años 2015 y 2050 modelado bajo el escenario climático pesimista.

Las UHs que requieren una prioridad de manejo Muy Alta son las correspondientes a los ríos Tecolostote (95255), Mayales (95156), Malacatoya (95258), Trinidad (95296) y Viejo (95298), ubicadas en la CH del Río San Juan; las UH de los ríos Murra (95186) y Olama (95188) en la CH del Río Grande de Matagalpa y la UH del Río Ulwaskin (95165) en la CH del Río Coco.

Cuadro 33. Prioridad de manejo de las unidades hidrográficas deficitarias

CH	UH	Prioridad	CH	UH	Prioridad
RCC	95165	Muy alta	RGM	95184	Alta
RGM	95186			95185	
	95188			95187	
RSJ	95255			95189	
	95256		95253		
	95258		95257		
	95296	95259			
PC	953375	95294			
	953376	95295			
RC	95164	95297	PC	953385	
	95166	Alta	RSJ	95291	
	95167			95292	
	95168		95293	Media	
			RC	95169	Baja

CH: Cuenca Hidrográfica; UH: Unidad Hidrográfica; RC: Río Coco; RACCN: Región Autónoma de la Costa Caribe Norte; RGM: Río Grande de Matagalpa; RACCS: Región Autónoma de la Costa Caribe Sur; RSJ: Río San Juan; PC: El Pacífico

V. CONCLUSIONES

La modelación con SWAT permitió, a través de la caracterización biofísica del territorio nicaragüense, identificar las unidades hidrográficas con un comportamiento hidrológico deficitario, es decir que por sus características no aportan agua a la red de drenaje, siendo estas las unidades ubicadas en las regiones del Pacífico, Norcentral y Central. Por la ubicación geográfica y distribución de las precipitaciones de las cuencas de la Región Autónoma Caribe Norte y Región Autónoma Caribe Sur no presentan UHs deficitarias, sin embargo no están exentas de problemas de inundación.

Las UHs que por su respuesta hidrológica clasificaron como deficitarias y que deben ser priorizadas para el diseño de Planes de Manejo Integrado de Cuencas, se encuentran ubicadas dentro del corredor seco de Nicaragua, en los municipios de Madriz, Nueva Segovia, Estelí y Matagalpa. Las unidades pertenecientes a la cuenca del Río San Juan son las que requieren mayor atención, ya que en relación con las demás UHs deficitarias, estas presentaron los mayores niveles de escurrimiento superficial y tasas de cargas de sedimentos debido a la disminución de la cobertura forestal y al incremento de las precipitaciones que se espera con el escenario pesimista.

Según el modelo hidrológico SWAT, los sistemas agroforestales y silvopastoriles son los usos identificados que más contribuyen al fortalecimiento de la resiliencia de las comunidades rurales nicaragüenses, ya que estos usos de la tierra son los que mayores beneficios ofrecen a la población y a la unidad hidrográfica como tal, como protección de los suelos ante la degradación por erosión, reducción de azolve de los cuerpos de agua, aumento al aporte a la recarga hídrica, contribución a la seguridad alimentaria y reducción de las pérdidas de agua por evaporación.

VI. RECOMENDACIONES

- ❖ Modernizar las estaciones meteorológicas de todo el país de modo que se contribuya a la generación de información diaria de todas las variables climáticas necesarias para el análisis del comportamiento hidrológico de las cuencas, y por otra parte el acceso en línea de las mismas.
- ❖ Desarrollar una base de datos nacional de suelos que contenga las propiedades físico-químicas de los mismos para cada sub-orden identificado en el país; y facilitar el acceso mediante la creación de una base de datos en línea, que permita el desarrollo de futuras investigaciones con información actualizada del país.
- ❖ Desarrollar planes de gestión integral de las cuencas hidrográficas del país, tomando en consideración el grado de prioridad designado a partir de las cargas de sedimentos y escurrimiento superficial.
- ❖ Generar mapas de uso de la tierra con una clasificación detallada de las superficies agrícolas, pecuarias y forestales que sirva como insumo para la modelación hidrológica con resultados más precisos acorde a las características de cada cuenca.
- ❖ Promover las prácticas dirigidas a la protección de los suelos en las comunidades rurales, para contribuir a la resiliencia ante el cambio climático, por ello se propone que:
 - En superficies agrícolas se fomenten las prácticas agronómicas como labranza mínima, no quema, asocio y rotación de cultivos, siembras en contorno, abonos verdes, mulching, entre otros, con el propósito de contribuir al reciclaje de nutrientes, reducir la escorrentía y arrastre de sedimentos, y propiciar la infiltración; prácticas mecánicas como las zanjas de infiltración para retener sedimentos y propiciar la infiltración y los diques de contención y terrazas para la estabilización de cárcavas y áreas susceptibles a la erosión hídrica.

- En superficies con fines pecuarios se recomienda la rotación de potreros y semiestabulación del ganado, con la finalidad de reducir las superficies de pecuarias y la compactación de los suelos ocasionado por el sobrepastoreo mediante el manejo adecuado de los potreros.

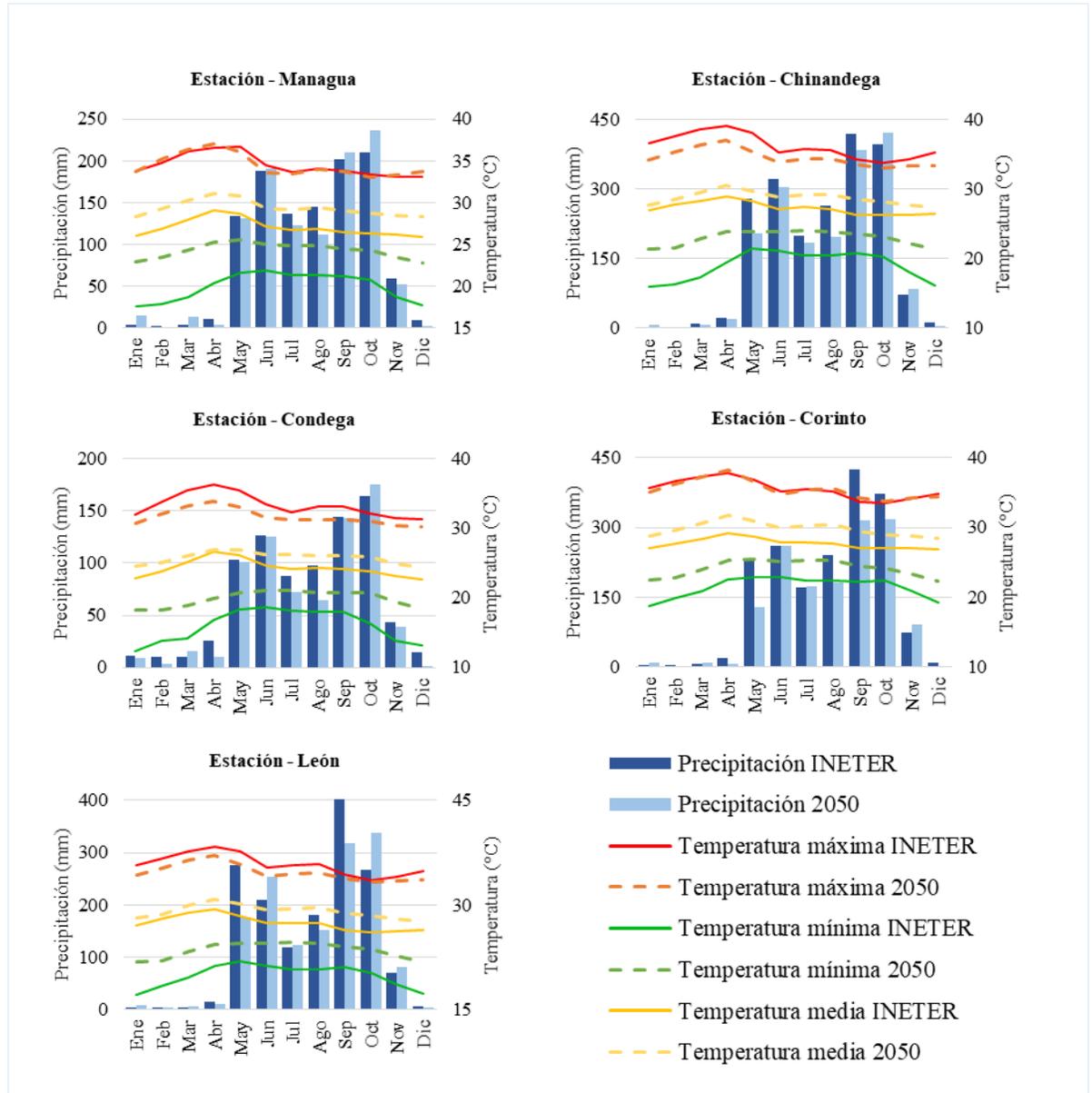
- ❖ Es importante recalcar que no se puede exigir la conservación del bosque como recomendación de uso en las superficies agropecuarias, debido a la necesidad misma de los pequeños y medianos productores que subsisten en terrenos con pendientes escarpadas, por lo que se recomienda que se promuevan los sistemas agroforestales y silvopastoriles como una alternativa para mitigar los efectos del cambio climático, y contribuir a la conservación de los ciclos naturales del agua y de los nutrientes.

VII. LITERATURA CITADA

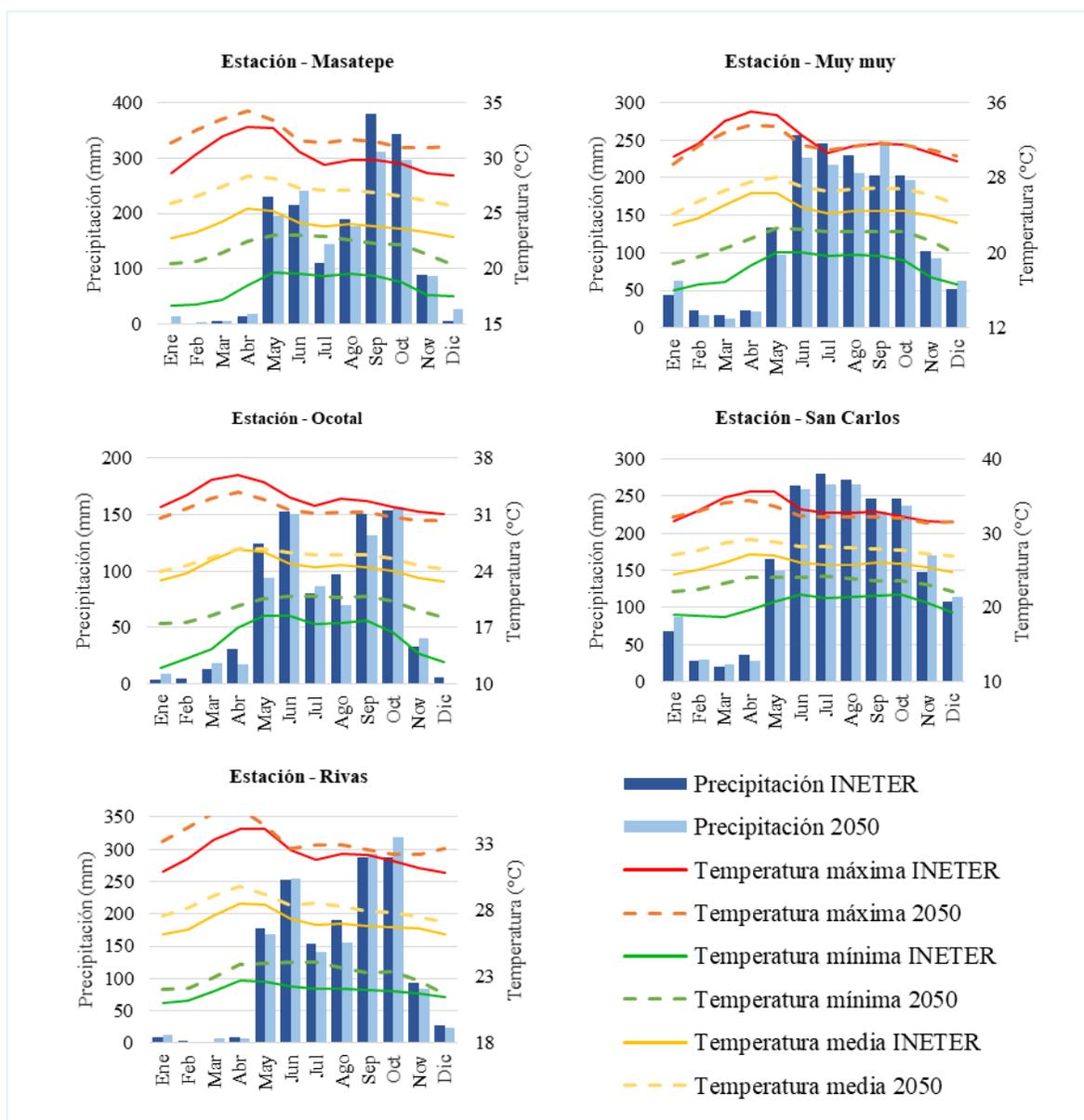
- Agua y Cambio Climático de las Américas. (2012). *Resumen Ejecutivo. Dialógo Regional de Políticas de Agua y Adaptación al Cambio Climático en las Américas (DRP)*. Resumen Ejecutivo. Recuperado el 20 de Marzo de 2017, de <https://es.slideshare.net/wiriana/agua-y-adaptacin-al-cambio-climtico-en-las-americas-soluciones-del-dialogo-regional-de-politicas-drp-14486587>
- Arnold, J., Kiniry, J., Srinivasan, R., Williams, J., Haney, E., & Neitsch, S. (2012). *Soil & Water Assessment Tool: Input/Output Documentation*. Texas: Texas Water Resources Institute. Recuperado el 30 de Marzo de 2017, de <http://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf>
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma, Italia. Recuperado el 15 de Abril de 2017, de <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>
- Íncer Barquero, J. (2014). *Geografía Dinámica de Nicaragua* (Cuarta ed.). (A. Casco Guido, Ed.) Managua, Nicaragua: Hispamer. Recuperado el 6 de Abril de 2017
- INETER. (2005). Clasificación climática segun Köppen. Período 1971-2000. Managua, Nicaragua. Recuperado el 07 de Julio de 2017, de http://webserver2.ineter.gob.ni/mapas/Nicaragua/clima/atlas/Clasificacion%20Climatic a/Clasificacion_Climatica_Koppen.jpg
- INETER. (2005). Mapa de precipitación Media Anual en milímetros (PP - mm). Período 1971-2000. Managua, Nicaragua. Recuperado el 22 de Agosto de 2017, de http://webserver2.ineter.gob.ni/mapas/Nicaragua/clima/atlas/Precipitacion/PP_media_a nual.jpg
- INETER. (s.f.). *INETER Dirección General de Meteorología*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2017, de <http://servmet.ineter.gob.ni/Meteorologia/climadenicaragua.php>
- INETER, ANA, UNI, GIZ-PROATAS. (2014). *Cuencas hidrográficas de Nicaragua bajo la metodología Pfafstetter*. Managua, Nicaragua. Recuperado el 7 de Junio de 2016
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015). *Cambio Climático: Bases Físicas. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC*. Madrid: MAGRAMA. Recuperado el 2017 de 4 de 24, de

- http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/publicaciones/publicaciones/guia_resumida_ar5-ipcc_tcm7-311196.pdf
- Olmo, M., & Nave, R. (s.f.). *HyperPhysics*. Recuperado el 21 de Marzo de 2017, de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Kinetic/watvap.html#c1>
- Perez Gallardo, S. J. (2001). *Modelo para evaluar la erosión Hídrica en Colombia utilizando Sistemas de Información Geográfica*. Bogotá, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Recuperado el 14 de Agosto de 2017, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd29/modeloerosion.pdf>
- SINIA-MARENA. (2010). *GEO IV Informe del estado del Ambiente. Nicaragua 2007-2008*. Managua. Recuperado el 20 de Marzo de 2017, de http://www.siagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/Informe_GEO_Nicaragua_2008.pdf
- Tapasco, J., Quintero, M., Uribe, N., Valencia, J., Calderón, S., Romero, G., . . . Ludeña, C. E. (2015). *Impactos económicos del Cambio Climático en Colombia: Recursos Hídricos*. Washington D.C: Banco Internacional de Desarrollo.
- UICN SUR. (2008). *Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2017, de http://75.98.169.113/uploads/documentos/Anexo_3_MANUAL_DE_DELIMITACION_Y_CODIFICACION_UH_Sudamerica_UICN_CAN.pdf

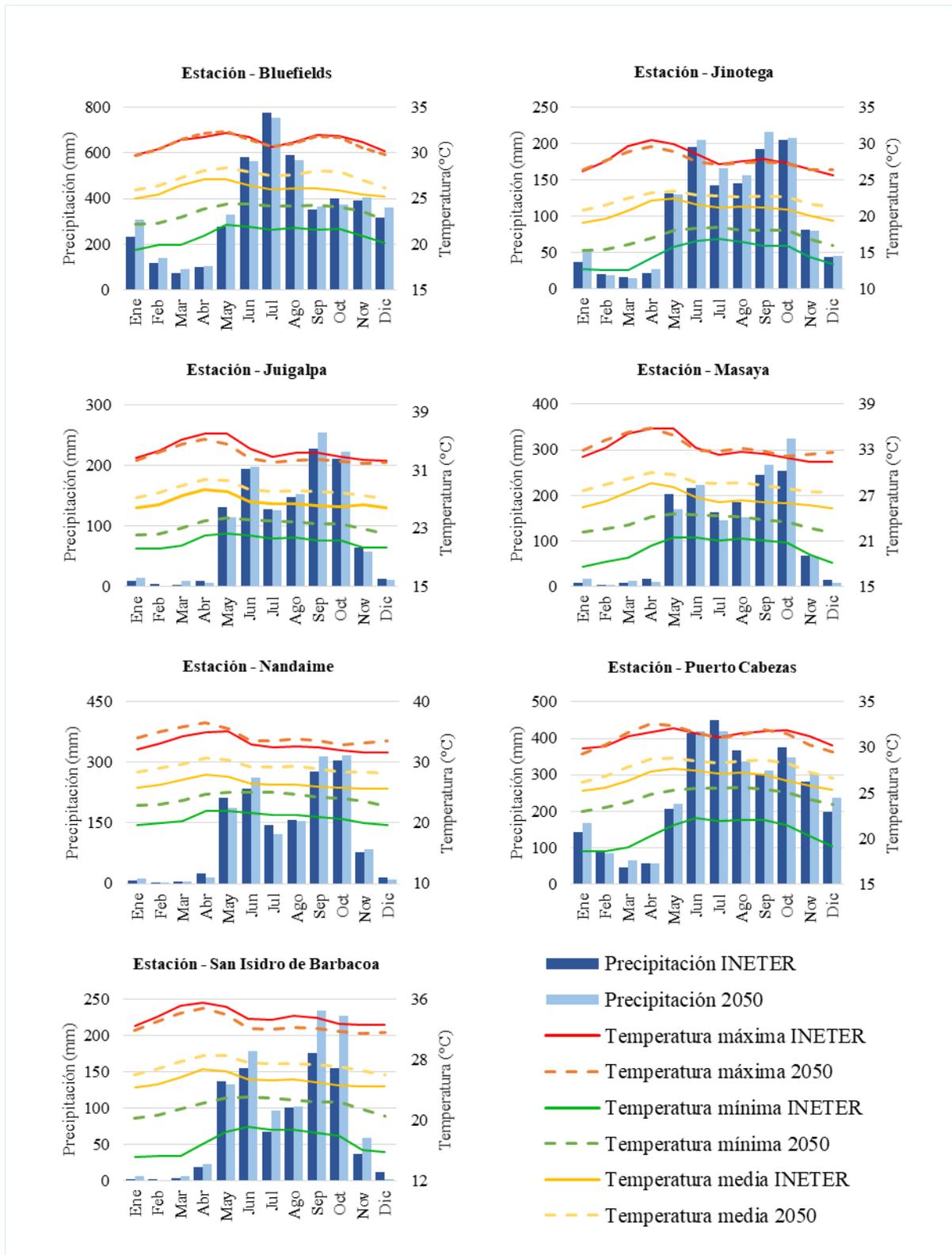
VIII. ANEXOS



Anexo 1. Comportamiento del clima histórico (1970-2007) vs clima futuro en las estaciones seleccionadas



Anexo 2. Comportamiento del clima histórico (1970-2007) vs clima futuro en las estaciones seleccionadas



Anexo 3. Comportamiento del clima histórico (1970-2007) vs clima futuro en las estaciones seleccionadas