



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente

Ingeniería en Recursos Naturales

*Proyección del escurrimiento superficial bajo
diferentes escenarios climáticos en la microcuenca
del río El Espinal, Pueblo Nuevo, Estelí.*

Autores:

Br. Miguel Reyes García Martínez

Br. Sarahí de los Ángeles González Gutiérrez

Asesores:

Ing. Mariann José Espinoza Acuña

MSc. Raquel Dolores Izabá Ruiz

Ing. Claudio González Espino

Managua, Nicaragua

Marzo, 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente
Ingeniería en Recursos Naturales

*Proyección del escurrimiento superficial bajo
diferentes escenarios climáticos en la microcuenca
del río El Espinal, Pueblo Nuevo, Estelí.*

Autores:

Br. Miguel Reyes García Martínez
Br. Sarahí de los Ángeles González Gutiérrez

Asesores:

Ing. Mariann José Espinoza Acuña
MSc. Raquel Dolores Izabá Ruiz
Ing. Claudio González Espino

Presentado a la consideración del honorable
tribunal evaluador como requisito final para optar
al título de Ingeniero en Recursos Naturales con
mención en Gestión Ambiental

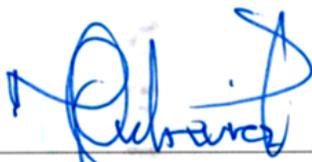
Managua, Nicaragua

Marzo, 2023

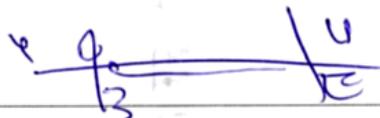
Este trabajo de graduación fue evaluado y aprobado por el honorable comité evaluador designado por la decanatura de la Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente como requisito parcial para optar al título profesional de:

**INGENIERO EN RECURSOS NATURALES CON MENCIÓN EN
GESTIÓN AMBIENTAL**

Miembros del Honorable Comité Evaluador:



Mp. Mario César Gutiérrez Alarcón
Presidente



MSc. Harvin Joel Bonilla Escoto
Secretario



PhD. Efraín Lucrecio Acuña Espinal
Vocal

En la Sala de conferencia LARENA 1, Managua, 29 de marzo 2023

DEDICATORIA

Dedico esta investigación de manera especial:

A mis amados padres: Rodolfo Adrián González Bucardo y Aura Lila Gutiérrez Blandón, quienes han sido mi más grande bendición y mi mayor inspiración en la vida, quienes con amor, esfuerzo y dedicación me han brindado su apoyo incondicional y me han motivado para luchar por mis sueños.

A mis hermanos, Cristhian Adriana González Gutiérrez y Rodolfo Josué González Gutiérrez, que han estado siempre presentes apoyándome e impulsándome para seguir adelante.

A nuestro querido docente y amigo, MSc. Ernesto Tünnermann Gutiérrez (D.E.P), que con amor y disciplina dedicó su vida a formar profesionales y personas de bien, siendo inspiración para quienes le conocimos.

A todos quienes con esfuerzo y dedicación luchan día a día para salir adelante y cumplir sus metas.

Br. Sarahí de los Ángeles González Gutiérrez

El presente trabajo de culminación de estudio es dedicado primeramente a Dios por brindarme la sabiduría y entendimiento y permitirme concluir con éxitos esta etapa tan importante de mi vida.

A mi madre, Juliana del Carmen Martínez Alejo, que, con sacrificios, dedicación constantes y amor de madre incondicional supo sacarme adelante, más allá de todas sus limitaciones y forjar el hombre de bien que soy hoy en día. Gracias por enseñarme el camino de la vida, por tus consejos y por todo el amor y apoyo incondicional que me has dado.

A mis hermanos (Mario, Erick, Julio), que con sus consejos me han orientado a perseverar en esta larga etapa de mi vida, hasta alcanzar mi meta. De igual forma a mis amistades más cercanas quienes siempre han creído en mí.

A la señorita, María Alejandra Pavón, quien ha estado durante este proceso conmigo brindándome apoyo, en cada una de las etapas.

Dedicado especialmente a el profesor MSc. Ernesto Tünnermann Gutiérrez, (D.E.P), por sus buenos consejos y ayudarme a perseverar en este largo camino. A quien en vida fue una de las mejores personas que he conocido y un gran ser humano gracias.

Br. Miguel Reyes García Martínez

AGRADECIMIENTO

Agradecemos primeramente a Dios por darnos la fortaleza, sabiduría y el entendimiento para culminar con éxito esta etapa de nuestras vidas.

A nuestros padres, por inculcarnos buenos valores, enseñarnos a ser personas de bien y servicial, por estar siempre pendientes de nuestras necesidades, y transmitirnos su fortaleza ante las adversidades.

A nuestra alma máter Universidad Nacional Agraria, por acogernos y brindarnos las condiciones necesarias para forjar profesionales de calidad, a los docentes que formaron parte de este sueño, por sus conocimientos compartidos y sus buenos consejos y al departamento de Deportes por su apoyo y por brindarme un refugio en los días difíciles.

Al proyecto “Cosecha de Agua” del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), por brindarnos la oportunidad de participar en esta investigación y por su apoyo financiero.

A nuestros asesores, Ing. Mariann José Espinoza Acuña, MSc. Raquel Dolores Izabá Ruiz e Ing. Claudio González Espino por la dedicación, tiempo y apoyo brindado en cada una de las etapas de esta investigación.

De manera especial al PhD. Efraín Acuña, por su colaboración y acompañamiento, a Osmín Molina, Roberto Mercado y Eyner Bustos, por su apoyo durante la etapa de recolección de datos.

A nuestros compañeros de clase y amigos más cercanos: Janitza González, Cesia Rivera y Michael Ríos, quienes han estado presentes durante este momento importante de nuestras vidas, con quienes compartimos experiencias inolvidables, he hicieron más ameno este recorrido, gracias por enseñarnos tanto, especialmente a Cledys Zelaya y Orlando Rodríguez, quienes nos apoyaron durante la investigación. Al Lic. Jonathan López por estar desde el inicio de esta formación universitaria, gracias por su apoyo incondicional.

Br. Sarahí de los Ángeles González Gutiérrez

Br. Miguel Reyes García Martínez

ÍNDICE DE CONTENIDO

SECCIÓN	PÁGINA
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE CUADRO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE ANEXOS	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
III. MARCO DE REFERENCIA	4
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	9
4.1. Tipo de estudio	9
4.2. Ubicación del área de estudio	9
4.3. Características biofísicas	9
4.4. Diseño Metodológico	11
4.4.1. Recopilación de dato	11
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
5.1. Caracterización biofísica de la microcuenca del río El Espinal	22
5.1.1. Morfometría	22
5.1.2. Recurso Suelo	24
5.1.3. Uso actual del suelo	37
5.1.4. Relación de la velocidad de infiltración con el uso del suelo	40

5.1.5.	Balance hídrico	43
5.2.	Comportamiento de los caudales	49
5.2.1.	Escenario histórico	49
5.2.2.	Escenarios futuros	52
5.2.3.	Influencia de las unidades de respuesta hidrológica sobre el escurrimiento superficial	53
VI.	CONCLUSIONES	59
VII.	RECOMENDACIONES	60
VIII.	LITERATURA CITADA	61
IX.	ANEXOS	64

ÍNDICE DE CUADRO

CUADRO	PÁGINA
Cuadro 1. Puntos de monitoreo de caudal de la microcuenca del río El Espinal	20
Cuadro 2. Parámetros morfométricos de la microcuenca del río El Espinal	22
Cuadro 3. Órdenes de suelo de la microcuenca del río El Espinal	26
Cuadro 4. Descripción del perfil del subgrupo Typic Haplusterts, en la comunidad Quebrada Abajo, Pueblo Nuevo, Estelí	27
Cuadro 5. Descripción del perfil del subgrupo Lithic Ustorthents, en la comunidad Quebrada Abajo, Pueblo Nuevo, Estelí	28
Cuadro 6. Descripción del perfil del subgrupo Vertic Haplustalfs, en la comunidad Quebrada Abajo, Pueblo Nuevo, Estelí	30
Cuadro 7. Descripción del perfil del subgrupo Typic Haplustalfs, en la comunidad Quebrada Abajo, Pueblo Nuevo, Estelí	32
Cuadro 8. Descripción del perfil del subgrupo Lithic Haplustalfs, en la Reserva Natural Tepesomoto- La Pataste	34
Cuadro 9. Descripción del perfil del subgrupo Vertic Argiustolls en la comunidad Motolín,	36
Cuadro 10. Uso actual del suelo de la microcuenca del río El Espinal.	37
Cuadro 11. Velocidad de infiltración de la microcuenca del río El Espinal	40
Cuadro 12 Tasa media de infiltración y su clasificación	41
Cuadro 13. Datos de caudales circulantes de la microcuenca del río El Espinal	51
Cuadro 14. Escurrimiento superficial en milímetros por subunidad, microcuenca El Espinal	53
Cuadro 15. Aporte de las unidades de respuesta hidrológicas en las Obras de cosecha de agua establecidas en la microcuenca del río El Espinal	55

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura 1. Localización geográfica de la microcuenca del río El Espinal.	10
Figura 2. Flujograma para estimar el escurrimiento superficial aplicando el modelo SWAT.	12
Figura 3. Trayectorias de concentración representativa RCP.	14
Figura 4. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión, según STRAHLER.	15
Figura 5. Puntos de monitoreo de caudal de la microcuenca del río El Espinal	21
Figura 6. Curva hipsométrica de la microcuenca del río El Espinal.	23
Figura 7. Órdenes de suelo de la microcuenca del río El Espinal.	24
Figura 8. Subgrupos taxonómicos de la microcuenca del río El Espinal.	25
Figura 9. Paisaje representativo de un suelo Typic Haplusterts, comunidad Quebrada Abajo	26
Figura 10. Perfil de suelo Typic Haplusterts, comunidad Quebrada Abajo.	26
Figura 11. Paisaje representativo del suelo Lithic Ustorthents, comunidad Quebrada Abajo.	28
Figura 12. Perfil de suelo Lithic Ustorthents, comunidad Quebrada Abajo.	28
Figura 13. Paisaje representativo del suelo Vertic Haplustalfs comunidad Quebrada Abajo.	30
Figura 14. Perfil de suelo Vertic Haplustalfs, comunidad Quebrada Abajo.	30
Figura 15. Paisaje representativo del suelo Typic Haplustalfs, comunidad El Chorro.	32
Figura 16. Perfil de suelo Typic Haplustalfs, comunidad El Chorro.	32
Figura 17. Paisaje representativo del suelo Lithic Haplustalfs, Reserva Natural, Tepesomoto - La Pataste.	34
Figura 18. Perfil de suelo Lithic Haplustalfs, Reserva Natural, Tepesomoto - La Pataste.	34
Figura 19. Paisaje representativo del suelo Vertic Argiustolls, comunidad Motolín.	36
Figura 20. Perfil de suelo Vertic Argiustolls, comunidad Motolín.	36
Figura 21. Uso actual del suelo de la microcuenca del río El Espinal.	37
Figura 22. Usos de suelo de la microcuenca del río El Espinal	38

Figura 23. Pasto	39
Figura 24. Bosque latifoliado	39
Figura 25. Café con sombra.	39
Figura 26. Cultivo Anual.	40
Figura 27. Tacotal y Arbusto.	40
Figura 28. Balance hídrico del registro histórico periodo 2000-2021 microcuenca del río El Espinal.	43
Figura 29. Balance hídrico RCP 2.6 periodo 2043 – 2069 microcuenca del río El Espinal.	45
Figura 30. Balance hídrico RCP 8.5 periodo 2043 – 2069 microcuenca del río El Espinal.	46
Figura 31. Comparación general de balances hídricos.	47
Figura 32. Hidrograma anual periodo 2003-2021 de la microcuenca del río El Espinal.	49
Figura 33. Hidrograma 2021 de la microcuenca del río El Espinal.	50
Figura 34. Hidrograma anual periodo 2043-2069 RCP 2.6 y RCP 8.5 de la microcuenca río El Espinal.	52
Figura 35. Unidades de Respuesta Hidrológica de la microcuenca del río El Espinal, Pueblo Nuevo, Estelí	54
Figura 36. Comportamiento del escurrimiento superficial en la microcuenca del río El Espinal, Pueblo Nuevo, Estelí.	56

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO	PÁGINA
Anexo 1. Balance hídrico del registro histórico 2000-2021 microcuenca del río El Espinal	64
Anexo 2. Balance hídrico RCP 2.6 periodo 2043 – 2069 microcuenca del río El Espinal	65
Anexo 3. Balance hídrico RCP 8.5 periodo 2043 – 2069 microcuenca del río El Espinal	65
Anexo 4. Consolidado de pruebas de infiltración microcuenca del río El Espinal	66

RESUMEN

Nicaragua, por su posición geográfica y situación de pobreza, es altamente vulnerable ante el Cambio Climático. El presente estudio se realizó con el objetivo de analizar el comportamiento del escurrimiento superficial bajo diferentes escenarios climáticos para valorar el potencial de las obras de cosecha de agua por escorrentía en la microcuenca del río El Espinal ubicada en Pueblo Nuevo, Estelí, en un área de 31.5 km², con elevaciones medias de 1140 msnm y precipitaciones medias anuales de 800 mm. Se utilizó la Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua (SWAT), la cual requiere información climática y cartográfica. Los datos climáticos históricos para un periodo de 20 años fueron descargados de Climate Engine y los datos futuros para 30 años en dos escenarios climáticos (RCP2.6 y RCP8.5), de MarkSim. La información de suelo fue recolectada en campo mediante barrenadas según la toposecuencia, muestras analizadas en laboratorio y pruebas de infiltración; para la clasificación de suelos a nivel de grupo taxonómico. Los usos del suelo se identificaron mediante clasificación supervisada. La microcuenca está formada mayormente por suelos alfisoles (45.44 %) con uso predominante de Pasto (37.83 %) seguido por café bajo sombra (18.88 %). Según los balances hídricos, los escenarios climáticos indican un aumento en las precipitaciones de 251.37 mm en comparación con registros históricos, sin embargo, el mayor déficit lo presenta el RCP8.5. Se identificaron 171 unidades de respuesta hidrológica con usos agropecuarios, en suelos Lithic Ustorthents y Typic Haplustalfs con pendientes moderadamente escarpadas a fuertemente escarpadas. Para los RCP 2.6 y RCP 8.5 habrá un aumento del escurrimiento superficial de más de 200 mm en comparación a los datos históricos lo que puede tener un impacto negativo en la recarga de las obras de cosecha de agua debido a la distribución de las precipitaciones ocasionando daños en las mismas.

Palabras claves: SWAT, uso de suelo, obras de cosecha de agua, unidades de respuesta hidrológica.

ABSTRACT

Nicaragua, due to its geographical position and situation of poverty, is highly vulnerable to Climate Change. The present study was carried out with the objective of analyzing the behavior of surface runoff under different climatic scenarios to assess the potential of water harvesting works by runoff in the El Espinal river micro-watershed located in Pueblo Nuevo, Estelí, in an area of 31.5 km², with average elevations of 1140 mamsl and average annual rainfall of 800 mm. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used, which requires climatic and cartographic information. Historical climate data for a period of 20 years were downloaded from Climate Engine and future data for 30 years in two climate scenarios (RCP 2.6 and RCP 8.5) from MarkSim. Soil information was collected in the field by drilling according to the toposequence, samples analyzed in the laboratory, and infiltration tests, for the classification of soils at the taxonomic group level. Land uses were identified by supervised classification. The micro-basin is formed mainly by alfisol soils (45.44 %) with predominant use of Pasture (37.83 %) followed by shaded coffee (18.88 %). According to the water balances, the climatic scenarios indicate an increase in rainfall of 251.37 mm compared to historical records, however, the greatest deficit is presented by RCP 8.5. 171 hydrological response units with agricultural uses were identified, on Lithic Ustorthents and Typic Haplustalfs soils with moderately steep to strongly steep slopes. For RCP 2.6 and RCP 8.5 there will be an increase in surface runoff of more than 200 mm compared to historical data, which may have a negative impact on the recharge of water harvesting works due to the distribution of rainfall, causing damage in the same.

Keywords: SWAT, land use, water harvesting works, hydrological response units.

I. INTRODUCCIÓN

Acorde con el sexto informe sobre Cambio Climático y la Tierra del Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021), la frecuencia e intensidad de algunas condiciones meteorológicas y eventos climáticos extremos han aumentado a consecuencia del calentamiento global y seguirán incrementando bajo escenarios de emisiones medias a altas. Se evidencia que los cambios en las condiciones de la tierra modulan la probabilidad, la intensidad y duración de muchos eventos extremos, incluidas las olas de calor y los eventos de precipitaciones intensas.

La Comisión Económica para América Latina (CEPAL, 2010) afirman que el Cambio Climático representa un fenómeno relacionado negativamente con la seguridad alimentaria de la humanidad, puesto que conlleva una tendencia generalizada de reducción en la producción agropecuaria. Los cambios en las variables climáticas (precipitación y temperatura) que han ocurrido en los últimos años han causado graves pérdidas tanto como físicas monetarias e inclusive humanas en los países centroamericanos. Los cambios futuros que se proyectan son un riesgo creciente, sobre todo para los países en desarrollo con vulnerabilidades socioeconómicas (pobreza, falta de inversión, etc.) y deterioro ambiental como es el caso de Nicaragua.

Nicaragua, por su posición geográfica y situación de pobreza, es un país altamente vulnerable a fenómenos meteorológicos como inundaciones, huracanes y sequías. El cambio climático podría agudizar esta vulnerabilidad por sus efectos sobre estos fenómenos. (CEPAL, 2010)

En este contexto, se implementa el proyecto “Adaptación de la agricultura al cambio climático a través de la cosecha de agua en Nicaragua” ejecutado por el CATIE, en colaboración con el INTA y financiado por COSUDE. Esta acción se desarrolla en el corredor seco de Las Segovia, en Nicaragua y apoya, principalmente, la construcción de infraestructura de captación de agua superficial, utilizándose para fines productivos. Se desarrollan actividades bajo un enfoque de sistema de cosecha de agua, entendiéndolo

como la suma del área de captación o recarga de la parte alta de la microcuenca y la instalación de obras físicas en las partes bajas.

Por lo antes expuesto, la presente investigación tiene como propósito utilizar el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para analizar el comportamiento del escurrimiento superficial de la microcuenca del río El Espinal, Pueblo Nuevo, Estelí, tomando en consideración los escenarios climáticos de trayectoria de emisiones de gases de efecto invernadero propuesto en el V informe del IPCC; a fin de valorar el potencial de las obras de cosechas de agua por escorrentía superficial, implementados por CATIE para evaluar si son factibles y sostenibles en el futuro antes ciertos eventos de precipitaciones.

Enfocada en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para lograr un futuro mejor para todos, específicamente en el objetivo 13 Acción por el Clima y el 17 Alianza para lograr los objetivos; además de las líneas de investigación establecidas en el Sistema Universitario de Ciencias Tecnológicas e Innovación de la Universidad Nacional Agraria, en la línea 3 Manejo integral de suelos y agua; sub línea de investigación Drenaje superficial y sub superficial y en la línea 5 planificación y gestión del territorio; sub línea innovación y desarrollo de tecnologías geoespaciales para la gestión de los recursos naturales.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento del escurrimiento superficial bajo diferentes escenarios climáticos para la valoración del potencial de obras de cosecha de agua por escorrentía en la microcuenca del río El Espinal, Pueblo Nuevo, Estelí.

2.2. Objetivos específicos

- Actualizar el estado de los recursos suelo y agua a través de la caracterización de la microcuenca.
- Comparar los caudales medidos durante un ciclo hidrológico con los caudales simulados bajo distintos escenarios climáticos para evidenciar la dinámica futura de los caudales.
- Identificar la influencia de las unidades de respuesta hidrológica sobre el comportamiento del escurrimiento superficial bajo distintos escenarios climáticos en la microcuenca.

III. MARCO DE REFERENCIA

La estimación de caudales es uno de los elementos más importantes en los procesos de evaluación del manejo sostenible de las cuencas hidrográficas, lo que, unido al aumento de la capacidad de cálculo computacional, ha propiciado el desarrollo, desde los años noventa hasta la actualidad de diversos modelos de simulación hidrológica (Fernández. 2017, p. 21).

De entre los modelos de simulación hidrológica destaca SWAT (Soil and Water Assessment Tool), el cual se puede definir, de forma sencilla, como un software para el modelado integral de grandes cuencas, que permite conocer la dinámica hídrica de las cuencas bajo diversos escenarios actuales y futuros, permitiendo una visión holística de la cuenca (Fernández. 2017, p. 21).

Por tanto, SWAT permite caracterizar los procesos físicos que controlan la transformación de la precipitación en escorrentía, a la vez que modela la erosión del suelo y el transporte de sedimentos, así como la movilización de nutrientes y la dispersión de contaminantes, en el conjunto de la cuenca (Fernández, 2017).

SWAT realmente es una herramienta que permite evaluar el impacto de las actividades humanas y/o del cambio climático sobre la cantidad y régimen de la producción de agua y sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica, de subcuenca o de Unidades Hidrológicas de Respuesta (HRU). Pero también es un software que fácilmente se transforma en una herramienta de planificación puesto que permite valorar los efectos de los cambios de uso del suelo, de las actividades de restauración y de las distintas prácticas de conservación del suelo sobre el conjunto de la cuenca, optimizando de la toma de decisiones del gestor (Fernández, 2017).

La investigación de la tesis “Impacto del cambio climático en el comportamiento hidrológicas de las cuencas hidrográficas aplicando el modelamiento (SWAT) en Nicaragua” por Espinoza (2017), desarrollada en la unidad hidrográfica número 9516

definida según la metodología Pfafstetter, en la cual se encuentra situada la microcuenca El Espinal, se realizó el procesamiento y tratamiento de información de base de datos de estaciones climáticas como el debido análisis de las variables, además de la definición de características biofísicas del suelo de toda la unidad hidrográfica, así como la información de los datos de precipitación.

En el análisis de información se interpretaron los datos de escurrimientos superficial, a partir de un modelo de elevación digital (DEM), para lograrlo se tomó como punto de partida la división de una cuenca hidrográfica en subunidades con SWAT, que estima las cargas de sedimentos, nutrientes, entre otros, transportados por escorrentías. En el escenario pesimista se espera que en algunas cuencas del país haya disminución de las precipitaciones y que en general haya aumento de las temperaturas en todas las cuencas, afectando así a la cuenca 9516, donde se sitúa la microcuenca del río El Espinal.

Además, los suelos de toda la cuenca presentan mayoritariamente suelos Haplic Nitisol (Espinoza, 2017), los cuales ocupan el 80.46 % de la superficie, suelos rojizos con un uso actual de bosque latifoliados densos presentes en las UHs que aportan en comparación con las UHs que no aportan agua al caudal que poseen suelos Haplic Phaeozem, Eutric Regosol, Dystric Cambisols, Vertic Luvisol y Eutric Vertisol; estos mismos se encuentran ocupados con bosques latifoliados y pinares en pendientes planas y fuertemente inclinadas.

En la investigación titulada “Influencia del uso del suelo en la dinámica hídrica de las aguas superficiales en la Microcuenca río Pire, municipio de Condega, departamento de Estelí” desarrollada por Blandón (2018), se evidencia en la unidad hidrográfica que se ubica en la subcuenca Estelí que a su vez pertenece a la unidad hidrográfica 9516 (Río Coco) presenta el siguiente comportamiento.

Mediante la modelación con SWAT, con base de datos climáticos de 10 años provenientes de tres estaciones meteorológicas suministrado por el Instituto de Estudios Territoriales (INETER) e información actualizada proveniente del área de hidrogeología - CIRA, UNAN, levantamiento edáfico realizado por la Universidad Nacional Agraria (UNA), se

evaluó los impactos del uso del suelo y la influencia de la producción de agua, sedimentos, escorrentía, y calidad de las aguas superficiales en la unidad hidrográfica.

Dentro de los principales resultados se evidencia que, dentro de los usos potenciales del suelo el 57 % del territorio es forestal y un 26 % bosque de producción y café, en la cual ha tenido variaciones en los últimos años a consecuencia del aumento demográfico y la ocupación de tierras para actividades agropecuarias. En el año 2015, las áreas más extensas se encontraban ocupadas por tacotal y pasto (54.5 km²), pastizales (41 km²), cultivo anual (8.1 km²), bosque latifoliado (5.2 km²) y poblado (0.2 km²). La agricultura extensiva aumenta las áreas desprovistas de vegetación, lo cual provoca un mayor arrastre de sedimentos y degradación de los suelos.

El promedio de los caudales simulados con SWAT en el periodo 2007-2016 es de 28.3 m³.año⁻¹, registrándose los años 2010, 2011 y 2012 como húmedos debido a que sus caudales registrados son mayores al promedio, los años 2007, 2009, 2013, 2014, 2015 y 2016 como secos, esto asociado a las características climáticas de la zona y el año 2018 como año promedio.

En los volúmenes de escorrentía superficial del 100 % de las precipitaciones caídas en años secos el 4 % pasa a ser parte de la escorrentía y en los años húmedos el 13 % conforma la escorrentía y se observaron eventos de mayor magnitud durante los años 2010, 2011 y 2012 vinculados al fenómeno de la niña, lo cual genera impactos negativos como aumento de sedimentos, disminución del tiempo de concentración de las aguas provocando inundaciones en la parte baja de la microcuenca.

Presenta cuatro tipos de suelo: Alfisol, Entisol, Ultisol, Molisol, este último ocupa el 87 % de la totalidad del territorio el cual por sus características físicas se considera como suelo apto para bosques de protección. Para evaluar la influencia del uso del suelo en la dinámica hidrológica se modelaron dos escenarios Uso actual y Uso potencial; lo que indica que el uso actual está generando 31 mm de escorrentía anual y el uso potencial generó 20 mm, el

escenario 1 produjo 2,254.8 ton/m/año y el escenario 2 presentó una reducción de un 64 % equivalente a 849.7 ton/m/año.

Las unidades de respuesta hidrológica que presentan mayores volúmenes de escorrentía y sedimentos están ubicadas en zonas de recarga hídrica alta afectando directamente en la disminución de percolación y recarga de acuíferos, pero puede aprovecharse en obras de cosecha de agua para ser utilizada en periodo de escasez.

En la investigación titulada “Análisis de amenazas a deslizamiento de tierra e inundación y su influencia socio ambiental en la gestión de riesgo en la microcuenca El Espinal, Pueblo Nuevo, Estelí” desarrollada por Velázquez y Acuña (2015) la microcuenca El Espinal presenta los siguientes resultados. Mediante la metodología Determinación de la vulnerabilidad global según Wilches-Chaux (1998), hay diferentes tipos de vulnerabilidad global: social, económica, política, institucional, ideológica, cultural, educativa, física, técnica, ecológica.

La evaluación de la vulnerabilidad en la microcuenca El Espinal consistió en la identificación de los elementos que pudieran estar en riesgo ante las amenazas presentes de inundación y deslizamiento en el área de estudio. Para la misma, se elaboró un formulario con indicadores que se consideraron útiles para cada una de las vulnerabilidades evaluadas; dichos rangos de cuantificación de los indicadores se realizaron de acuerdo con experiencia del trabajo realizado en la temática de riesgo y consulta con expertos, las que posteriormente fueron validadas en campo con los comunitarios.

Una porción significativa del territorio está propensa a los fenómenos de deslizamientos lo que lo categoriza en 5 niveles. El nivel moderado correspondiente al 22 %, los niveles alta y muy alta susceptibilidad, correspondiendo al 19 % del área de la microcuenca (15 y 4 % respectivamente), que corresponde a áreas con pendientes mayores de 30 %, alta densidad de fractura y conflictos de uso de suelo alto a muy alto, son áreas fuertemente intervenidas por actividades agropecuarias y aprovechamiento forestal en pendientes muy pronunciadas

desprovistas de vegetación. Las comunidades con mayor vulnerabilidad son: San Pedro, Horno, Chaguitón, Los Llanos 1 y 2, San José.

Los resultados de esta delimitación de susceptibilidad a inundaciones muestran un mayor desbordamiento del río en las comunidades que se encuentran en la parte noreste de la zona de estudio, específicamente en las comunidades de Paso Hondo y La Calera, donde existen concentración de infraestructuras de viviendas, puentes vado y cultivos de hortalizas con granos básicos en los márgenes del río; que ante una avenida rápida de la parte alta, se afectarían de manera considerable, impactando aún más la economía de los habitantes.

Resultó con vulnerabilidad ecológica muy alta de acuerdo con su caracterización de ponderación con el 88 %. Los indicadores que se tomaron en cuenta fueron: grado de deforestación, intensidad de uso del suelo y viviendas con acceso a agua de consumo humano. El principal problema en la zona de estudio es el nivel de pobreza; al no existir trabajos permanentes, los comunitarios no pueden suplir sus necesidades, lo que ocasiona un problema fundamental que es el uso inadecuado del suelo y mayor explotación de los recursos naturales que ha provocado que en la zona exista una alta vulnerabilidad a inundaciones y deslizamiento.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Tipo de estudio

El estudio realizado en la microcuenca del río El Espinal, es de tipo cuantitativo no experimental, debido a que se analiza el comportamiento del escurrimiento superficial bajo diferentes escenarios climáticos (actual y futuro) para valorar el potencial de las obras de cosecha de agua establecidas.

4.2. Ubicación del área de estudio

La microcuenca del río El Espinal está ubicada en las coordenadas geográficas 13°17'51" y 13°23'48" latitud Norte, 86°32'14" y 86°36'12" longitud Oeste en Pueblo Nuevo, municipio de Estelí; y San Lucas y Las Sabanas, de Madriz. Esta microcuenca presenta un área de 31.5 km², y forma parte de la subcuenca del Río Estelí, la cual pertenece a la cuenca del Río Coco. (Figura 1)

4.3. Características biofísicas

TROCAIRE & UNA (2011), en el “Plan de ordenamiento territorial microcuenca El Espinal Pueblo Nuevo – Estelí”, brinda la siguiente caracterización del área de estudio:

- El clima es de sabana tropical caracterizado por ser cálido y seco, presenta precipitaciones medias de 800 mm anuales, en la parte baja de la microcuenca y en la parte alta, de 900 a 1250 mm anuales, con un periodo de canícula no muy acentuada.
- La geología de la microcuenca está caracterizada por el predominio de rocas volcánicas del terciario, de los grupos Matagalpa y Coyol.
- Presenta un relieve montañoso en la parte alta; serranías y lomeríos en la parte media; y planicies en la parte baja. En la parte alta donde se encuentra el área protegida Tepesomoto-La Patasta, la topografía es muy accidentada con laderas escarpadas.

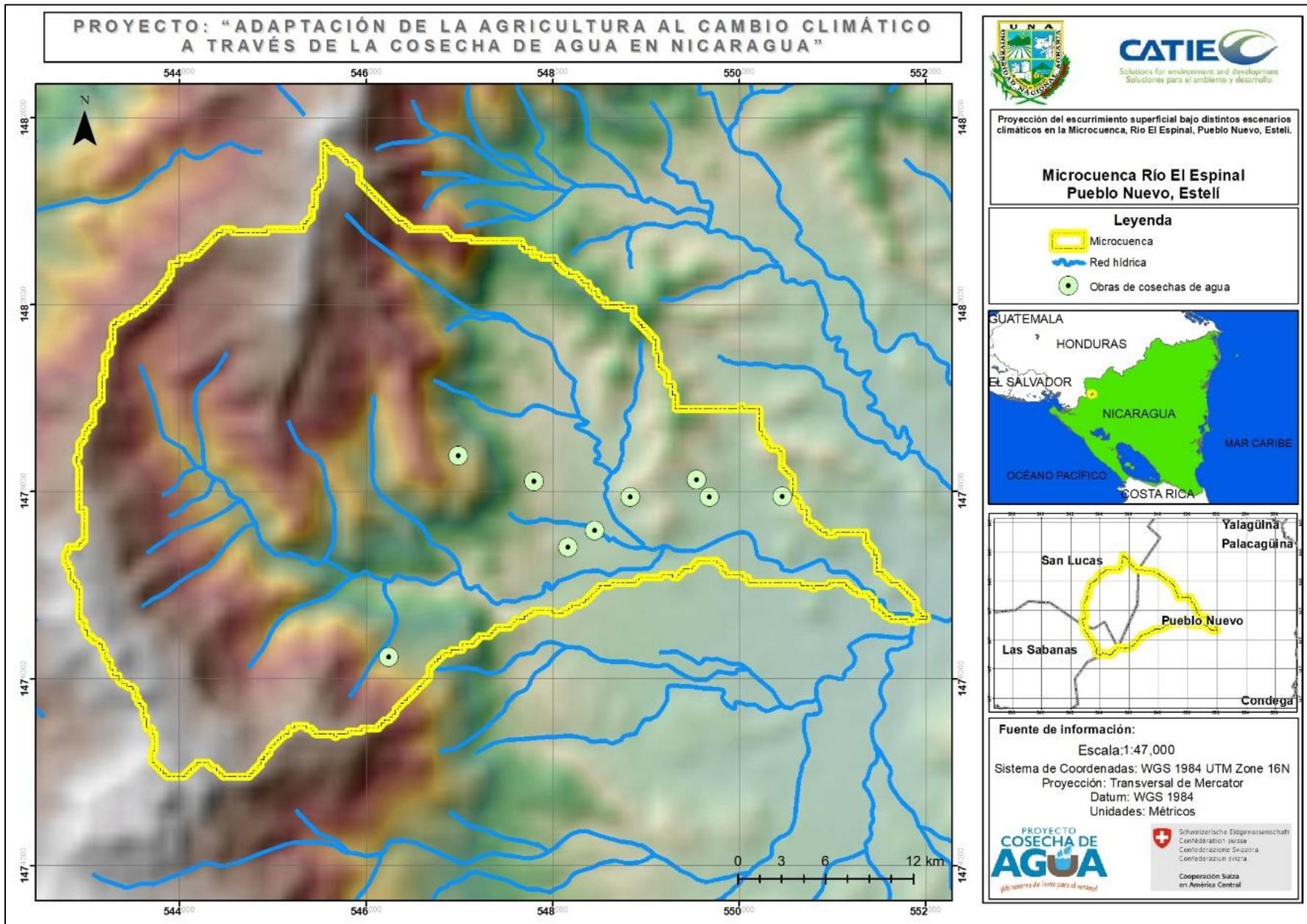


Figura 1. Localización geográfica de la microcuenca del río El Espinal.

- En la parte baja de la microcuenca predominan los bosques espinosos, arbustos de zona seca caducifolia y bosque seco subtropical, con especies arbustivas en su mayoría de porte bajo. En la parte media, vegetación de tipo perennifolia, con plantas epifitas, y especies de plantas y arbustos de las zonas más frescas. La parte alta, presenta vegetación perennifolia, característica de una zona de vida de bosque muy húmedo montano bajo subtropical.

4.4. Diseño Metodológico

El modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) empleado en la investigación, es un software de dominio privado, que trabaja bajo la interfaz de ArcMap del software ArcGIS que comprende la recopilación de datos de información climática, propiedades de suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de suelo en las cuencas para utilizar estas como datos de entrada en formato ráster, la calibración del modelo se realizó de forma manual, con un parámetro de 3 años, ya que no se cuenta con registros de datos diarios de la microcuenca.

Para modelar los procesos hidrológicos, primero divide la cuenca en subcuencas y luego, en unidades de respuesta hidrológica (HRU) según el uso de la tierra y los suelos, seguido estima la escorrentía para cada HRU por separado y luego la escorrentía total para toda la cuenca. (CIAT, 2010)

4.4.1. Recopilación de dato

La recopilación de datos consistió en la descarga de variables climáticas, así como información geoespacial del relieve, y datos recolectados en campo sobre las propiedades del suelo y el uso del suelo, para el análisis del comportamiento del escurrimiento superficial. En la figura 2 se indican los insumos requeridos para realizar la modelación hidrológica.

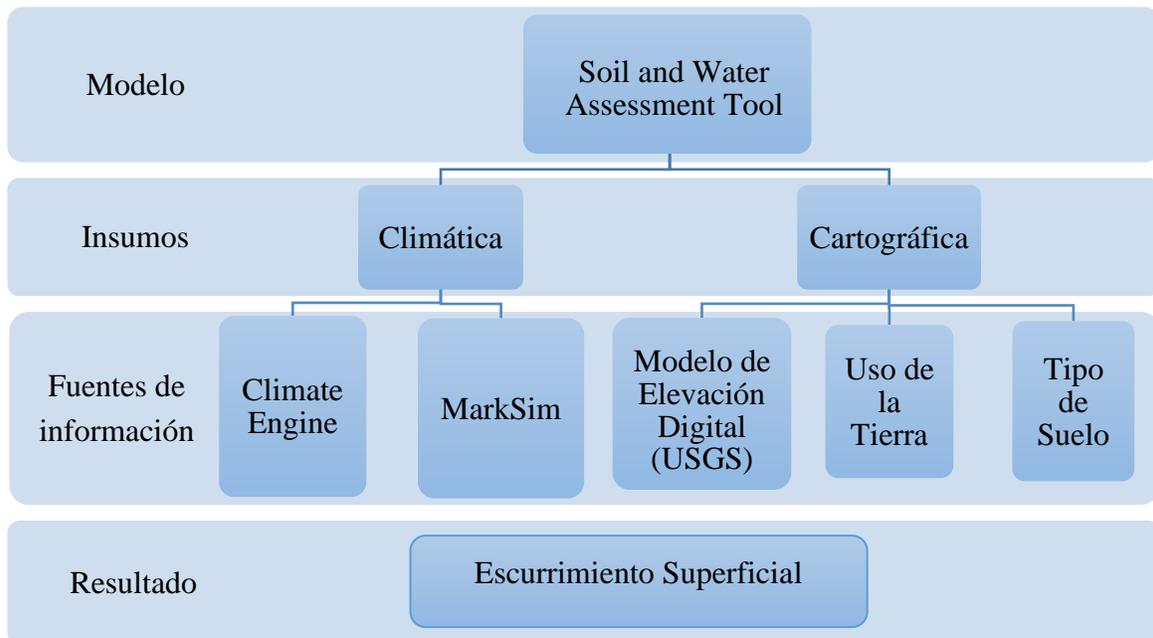


Figura 2. Flujoograma para estimar el escurrimiento superficial aplicando el modelo SWAT.

Como resultados se obtiene el escurrimiento superficial a partir de los cálculos de los aportes de cada una de las unidades de respuesta hidrológicas (HRU) que conforman la microcuenca. Las HRU son áreas de tierra dentro de la sub-cuenca que corresponden a todas las únicas posibles combinaciones de cobertura de tierra, suelo, y pendiente en la cuenca (CIAT, 2010).

Revisión documental

Consistió en la revisión y recopilación de información secundaria de investigaciones, informes, revistas, artículos y otras fuentes sobre temáticas de uso y caracterización de suelo, monitoreo de caudales, escorrentía superficial y registro de eventos climáticos en Nicaragua.

Recopilación de datos climáticos

Los datos climáticos se obtuvieron en dos plataformas. Para los datos históricos se utilizó Climate Engine para un periodo de 20 años (2000 hasta 2021). Los datos futuros se descargaron de la plataforma MarkSim, en un periodo de 30 años (2040 hasta 2069).

Las variables tomadas tanto para datos históricos como los datos futuros fueron, la temperatura, precipitación, radiación solar y velocidad del viento, datos descargados con valores absolutos.

Escenario climático Histórico

Las variables del registro histórico se descargaron a través de la plataforma Climate Engine, disponibles de manera gratuita, utilizando el dataset CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) para las precipitaciones diarias y CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) para las temperaturas máximas y mínimas, radiación solar y velocidad del viento. Posteriormente a la descarga se convirtieron de archivos Excel a hojas de texto para ser ingresadas en SWAT en los requerimientos de información climática.

Escenarios climáticos futuros

Para la descarga de variables de los escenarios climáticos futuros se utilizó la plataforma MarkSim la cual genera datos meteorológicos diarios simulados obtenidos de la interpolación de estaciones meteorológicas de todo el mundo. En la figura 3 se muestran las trayectorias de concentración representativa (RCP) de las emisiones de dióxido de carbono CO₂ en los diferentes escenarios, en este estudio se utilizaron los RCP 2.6 y RCP 8.5.

Los datos de los registros históricos y los datos futuros fueron utilizados como insumo para las bases de datos utilizadas en SWAT, también con la finalidad de realizar balances hídricos aplicando la metodología Thornthwaite para comparar los escenarios climáticos.

Según el V informe del IPCC (2014), las trayectorias de concentración representativas (RCP) tienen una variación notoria entre los escenarios a partir del año 2040 por lo que se toma como punto de partida para una proyección de 30 años es decir hasta el 2069; los escenarios climáticos a analizar son el RCP 2.6 que tiene por objetivo que sea probable mantener el calentamiento global a menos de 2°C por encima de las temperaturas preindustriales y el RCP 8.5 con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero sin esfuerzos adicionales para limitarlas.

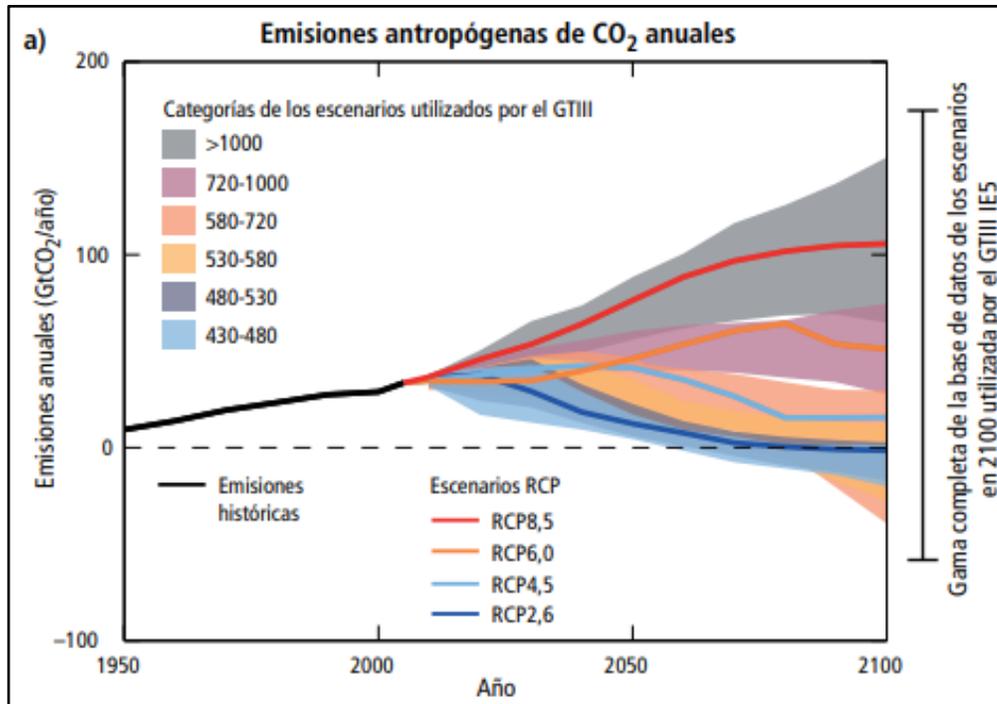


Figura 3. Trayectorias de concentración representativa RCP.

Fuente: V informe del IPCC, 2014

Caracterización morfométrica

La hidrología está dirigida al cálculo de la escorrentía superficial, caudales procesos que se generan sobre una microcuenca, ante la ocurrencia de determinado evento climático de precipitación, de ahí la importancia de conocer las características morfométricas de la microcuenca, para conocer su comportamiento.

Para la obtención de la caracterización morfométrica de la microcuenca del río El Espinal se tuvo como requerimiento principal el modelo de elevación digital (DEM) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y hojas cartográficas para determinar los parámetros de forma, relieve y drenaje. Se trabajó en el software ArcGIS 10.5. A continuación, se describen los parámetros calculados.

Parámetros de forma

Factor de forma

Según Gámez (2010), “esta característica tiene fundamental importancia en la cantidad de escorrentía expresado como factor k, adimensional conocido como índice de capacidad o coeficiente de Gravelius” (p. 36). Este se expresa como.

$$K = 0.28P.A^{-0.5}$$

Dónde:

K: coeficiente de compacidad o de Gravelius, adimensional

P: perímetro de la cuenca (km)

A: área de la cuenca (km²)

Parámetros de relieve

Elevación media de la microcuenca

“La curva hipsométrica permite caracterizar el relieve. Una pendiente fuerte en el origen hacia cotas inferiores indica llanuras o penillanuras; si la pendiente es muy fuerte hay peligro de inundación” (Gámez, 2010, p. 38). Además, dicta el grado de evolución físico de la cuenca, partiendo como referencia de la elevación mínima y máxima y un promedio de área acumulada entre las curvas de nivel que trazan paralelamente la microcuenca.

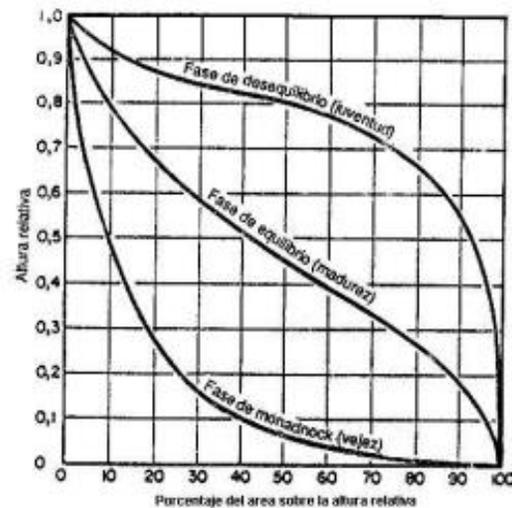


Figura 4. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión, según STRAHLER.

$$Em = (ai * ei). A^{-1}$$

Donde:

Em: elevación media de la cuenca (msnm)

ai: la iésima área entre dos curvas de nivel consecutivas.

ei: la iésima elevación media entre dos curvas de nivel consecutivas.

A: área de la cuenca (km²)

Pendiente media de la cuenca

La pendiente de una cuenca constituye una característica importante, puesto que condiciona la velocidad del escurrimiento superficial y subterráneo y en un momento dado, predice la erosión que éste produce en función del uso y manejo que se puede dar al suelo de sus vertientes. (Gámez, 2010, p. 39).

El cálculo de este parámetro requirió como insumo la generación de un ráster de las pendientes a partir del DEM.

Parámetros de drenaje

Forma de red hídrica

Una característica importante de cualquier cuenca y que interviene enormemente en la magnitud de los escurrimientos es la red de drenaje o sistema de drenaje, consistente en el número y trayectoria de los escurrimientos y su importancia radica en la eficiencia del drenaje de la cuenca, además la forma de drenaje es un indicador de las condiciones del suelo y de la superficie de la cuenca. (Gámez, 2010, p. 44)

Las seis formas más comunes de los sistemas de drenaje son:

- a. Dendrítico.
- b. En enrejado.
- c. Radial
- d. Paralelo.
- e. Anular.
- f. Rectangular

Longitud del cauce principal

Hace referencia al recorrido que realiza el cauce principal desde su inicio hasta su desembocadura y está expresado en km².

Pendiente del cauce principal

La pendiente del cauce de una corriente es la relación existente entre la diferencia de elevaciones de los extremos de la corriente y la longitud horizontal del cauce, así tenemos:

$$S = (H. Lr^{-1}) * 100$$

Donde:

S: pendiente del cauce (%).

H: desnivel entre los extremos del cauce (m)

Lr: longitud horizontal del cauce (m)

Cantidad de corrientes

Es el conteo de todas las corrientes incluyendo las que son catalogadas como tributarias y el cauce principal.

Densidad de corrientes

Indica la eficiencia de drenaje de una cuenca, pero debe manejarse con criterio, debido a que puede ocurrir que se tengan dos cuencas diferentes con la misma densidad de corrientes y estar drenadas en diferente forma, dependiendo de la longitud y disposición de sus corrientes. (Gámez, 2010, p. 49)

$$Dc = Nc \cdot A^{-1}$$

Donde:

Dc: densidad de corrientes

Nc: número de corrientes

A: área total de la cuenca (km²)

Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es la mayor o menor facilidad que presenta una cuenca hidrográfica para evacuar las aguas que provenientes de las precipitaciones quedan sobre la superficie de la tierra, debido al grado de saturación de las capas del subsuelo. Si el suelo se encuentra saturado y la lluvia continúa almacenándose sobre la superficie, llegará un momento en que las aguas allí contenidas escurrirán hacia el cauce natural, produciéndose así el drenaje de la cuenca. (Gámez, 2010, p. 50)

$$Dd = Lc \cdot A^{-1}$$

Donde:

Dd: densidad de drenaje ($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)

Lc: longitud total de las corrientes (km)

A: área total de la cuenca (km^2)

Muestreo y descripción de suelo

Para la recolección de datos en campo se tomó como punto de partida la toposecuencia, y la similitud en las características de los puntos de muestreo siguiendo la metodología de la Guía Técnica para Muestreo de Suelos (UNA & CRS, 2017). Las variables tomadas fueron la textura, color (seco y húmedo), consistencia (seco y húmedo), estructura y pedregosidad. Se realizó la descripción detallada de perfiles de suelo aplicando la metodología establecida en la Guía de campo para el muestreo y descripción de los perfiles de suelo elaborada por USDA (2017). Fueron consideradas las diferencias morfológicas del suelo visualizadas a partir del muestreo para seleccionar los suelos representativos de la microcuenca, las variables tomadas en campo fueron límite, textura, estructura, consistencia, pH, color, presencia de rocas, poros, raíces, carbonatos y materia orgánica.

Al finalizar la descripción in situ, se tomaron muestras de suelo de cada horizonte del perfil las cuales fueron enviadas al Laboratorio de Suelo y Agua (LABSA). Las variables analizadas fueron pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, bases de Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Sodio (Na), capacidad de intercambio catiónico, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y el porcentaje de partículas de arcilla, limo y arena. Posteriormente se reclasificó la base de datos general de SWAT 2012, con los obtenidos en campo y en laboratorio que se utilizaron como entrada para correr el modelo.

Pruebas de infiltración

Mediante el método del anillo sencillo de la Guía para la evaluación de calidad y salud del suelo de la USDA (1999) se realizaron 14 pruebas de infiltración bajo diferentes usos, el método consiste en aplicar una pulgada de agua (449 mm de agua) dentro de la superficie del anillo y cronometrar el tiempo hasta que se haya infiltrado completamente.

Se aplica el número de pulgadas que requiere hasta alcanzar la infiltración básica, estas pruebas se realizaron en el periodo comprendido de febrero a abril del año 2021. Y el criterio que se utilizó para la selección de los sitios fue por usos de los suelos.

Clasificación del uso del suelo

Para la clasificación de uso de suelos se utilizó la metodología de la clasificación supervisada o “Máxima verosimilitud”. Según Chuvieco (1990) el método supervisado parte de un cierto conocimiento adquirido previamente, o por trabajos de campos, que permite al intérprete delimitar en la imagen unas áreas pilotos, que se consideran suficiente representativa de las categorías que componen las leyendas.

Para ello se necesita realizar la descarga de la imagen satelital del sensor Sentinel 2 de la Plataforma de Explorador de la Tierra del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS. Se procedió a la selección del área de estudio, la selección del conjunto de datos, en tal caso se descargó la imagen del sensor sentinel-2^a como parámetro para esto se requiere descargar la imagen más actualizada y la que esté limpia de nubes.

Luego se procede a trabajar con el software de sistema de información geográfica ArcGIS, entre las bandas que se utilizaron están (BO2 = azul, BO3 = verde, BO4 = rojo y BO8 = infrarrojo), esto acompañado de la base de datos creada en Excel con las codificaciones de las fotografías tomadas en el lugar, bajo un formato que describe aspectos generales, como el tipo de cobertura predominante bajo los cuatro puntos de referencia norte, sur, este y oeste, coordenadas geográficas y el relieve, para generar el mapa de uso de cobertura actualizado. Posterior a esto se reclasificó de acuerdo a las categorías de SWAT dadas por códigos para los datos de entrada.

Monitoreo de caudales

Para realizar el monitoreo de caudal de la microcuenca El Espinal se establecieron 6 puntos estratégicos en las partes altas medias y baja, mismos que se tomarían en cuenta para generar las subunidades de respuesta hidrológica, considerando la accesibilidad a los puntos de monitoreo y la descarga de todos los tributarios hacia el río principal.

El monitoreo de caudal se efectuó durante un periodo de agosto 2021 hasta marzo 2022. Se realizó la recolección de los datos de forma mensual, aplicando el método sección-velocidad, mediante el uso del correntómetro de molinete con el modelo FP111 de Global Water. El método toma como parámetros la velocidad del flujo de la corriente del río y el área de la sección transversal, calculando el caudal con la fórmula de Hudson (1997):

$$Q = A * V$$

Dónde:

Q: caudal (m³.s⁻¹)

V: velocidad de la corriente (m.s⁻¹)

A: área de la sección transversal (m²)

En el cuadro 1 se muestran los puntos de monitoreo de caudal de la microcuenca del río El Espinal y sus coordenadas geográficas.

Cuadro 1. Puntos de monitoreo de caudal de la microcuenca del río El Espinal

Punto de monitoreo	X	Y
1	551775	1476696
2	548986	1477189
3	546982	1477195
4	545613	1477367
5	544683	1477874
6	549098	1477394

En la figura 5 se muestran los puntos de monitoreo de caudal establecidos en la microcuenca del río El Espinal.

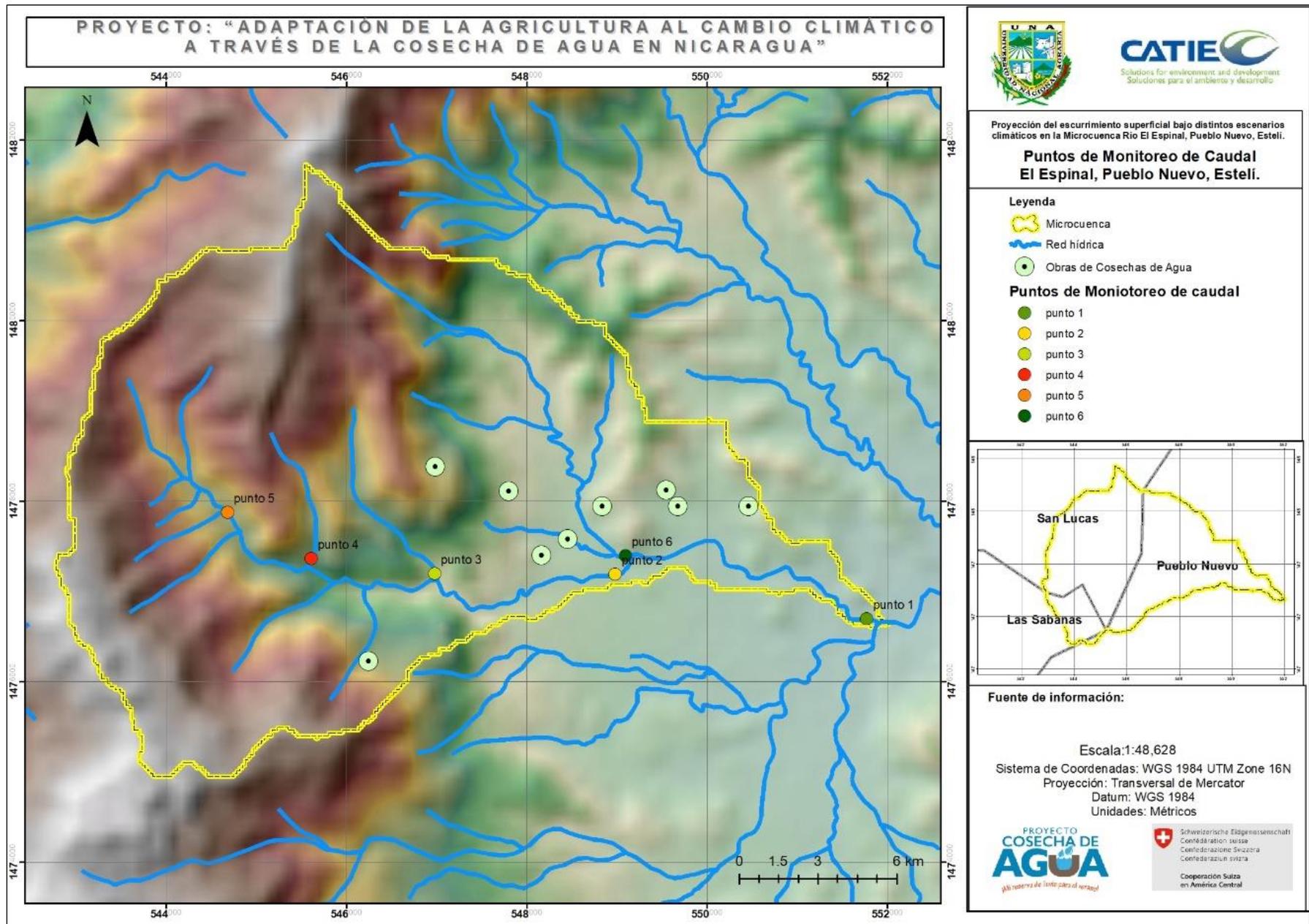


Figura 5. Puntos de monitoreo de caudal de la microcuenca del río El Espinal

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización biofísica de la microcuenca del río El Espinal

A continuación, se presentan las características biofísicas de la microcuenca del río El Espinal.

5.1.1. Morfometría

En el cuadro 2, presentamos los parámetros morfométricos de la microcuenca, representados por la forma, relieve y drenaje.

Cuadro 2. Parámetros morfométricos de la microcuenca del río El Espinal

Parámetros	Unidad	Valor
Parámetros de forma		
Área	km ²	31.52
Perímetro	km	34.6
Factor de forma		1.35
Coefficiente de Gravelius		Oval redonda- oval oblonga
Parámetros de relieve		
Elevación máxima	msnm	1740
Elevación mínima	msnm	640
Elevación media	msnm	1140
Pendiente media	%	15.92
Parámetros de drenaje		
Forma de la red hídrica		Dendrítico
Longitud del cauce principal	km	26.7
Pendiente media del cauce principal	%	17.94
Cantidad de corrientes	unidades	27
Densidad de drenaje	km.km ⁻²	1.06
Densidad de la corriente	Corriente.km ⁻²	0.86

Parámetros de forma

La microcuenca del río El Espinal tiene un área de 31.5 km², es considerada como una unidad pequeña según la clasificación de Gámez (2010) y cuenta con un perímetro de 34.6 km de longitud. En los resultados obtenidos según el índice de capacidad de Gravelius, su valor es de 1.35 que la clasifica entre oval redonda a oval oblonga, lo que favorece a un drenaje superficial más rápido, influyendo en la escorrentía superficial.

Parámetros de relieve

Cuenta con una elevación máxima de 1740 msnm y mínima de 640 msnm, respectivamente. La elevación media es de 1140 msnm, la forma de la curva (figura 6) indica que la microcuenca del río El Espinal se encuentra en una fase de madurez o adultez (una microcuenca en equilibrio) que favorece al escurrimiento superficial y “de acuerdo con su relieve no se deben esperar mayores disturbios causados por la erosión, salvo a aquellos que son normales por efectos del tiempo” (Salgado, 2012, p. 45).

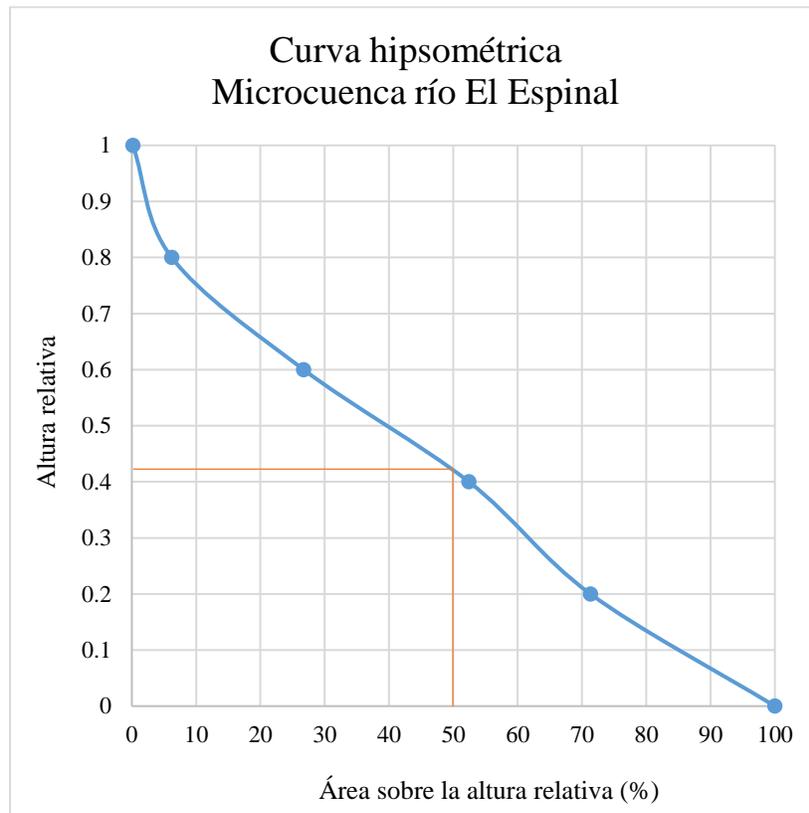


Figura 6. Curva hipsométrica de la microcuenca del río El Espinal.

Una pendiente media de 16 % haciéndola una microcuenca ligeramente escarpada, lo que en forma favorecería al recargo de las obras de cosecha de agua.

Cuando se incrementa la pendiente se produce una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes del cauce principal; de igual manera se incrementa la velocidad de escorrentía superficial, lo que favorece su capacidad de desprender y arrastrar sedimentos a la red de drenaje. (Salgado, 2012, p. 44).

Parámetros relacionados a la red de drenaje

Considerada una microcuenca exorreica, pues su desembocadura termina en otro río, cuenta con tres órdenes de corrientes que define los factores de la red de drenaje entre ríos intermitentes y permanentes con 27 corriente en total; la longitud de todas sus corrientes es de 35 km y la del cauce principal es de 6.78 km con una pendiente del 17.94 % en su cauce que favorece a un drenaje más rápido y susceptible al transporte de sedimentos.

Una densidad de corriente de 0.86 corrientes.km⁻² y una densidad de drenaje de 1.06 km.km⁻² esto en la microcuenca aumenta la facilidad de concentración de escorrentía superficial. Y, en casos de eventos de alta precipitación, un desagüe muy rápido, disminuyendo la cantidad de infiltración, además que por su proximidad de corrientes es una microcuenca bien drenada.

5.1.2. Recurso Suelo

En la microcuenca del río El Espinal se identificaron cuatro órdenes de suelo entre los que predominan suelos desarrollados del orden Alfisol (14.32 km²), seguido de suelos superficiales, posicionados principalmente en las laderas, de orden Entisol (7.99 km²), así como suelos con alto contenido de materia orgánica del orden Vertisol (5.87 km²) y orden Molisol (3.34 km²). Estos cuatro órdenes de suelos están conformados por seis subgrupos taxonómicos.

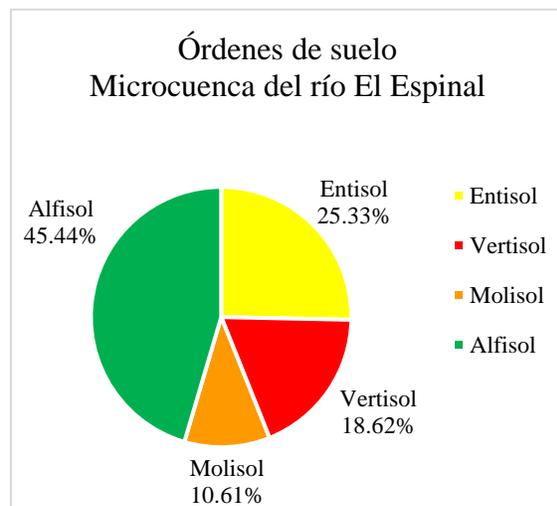


Figura 7. Órdenes de suelo de la microcuenca del río El Espinal.

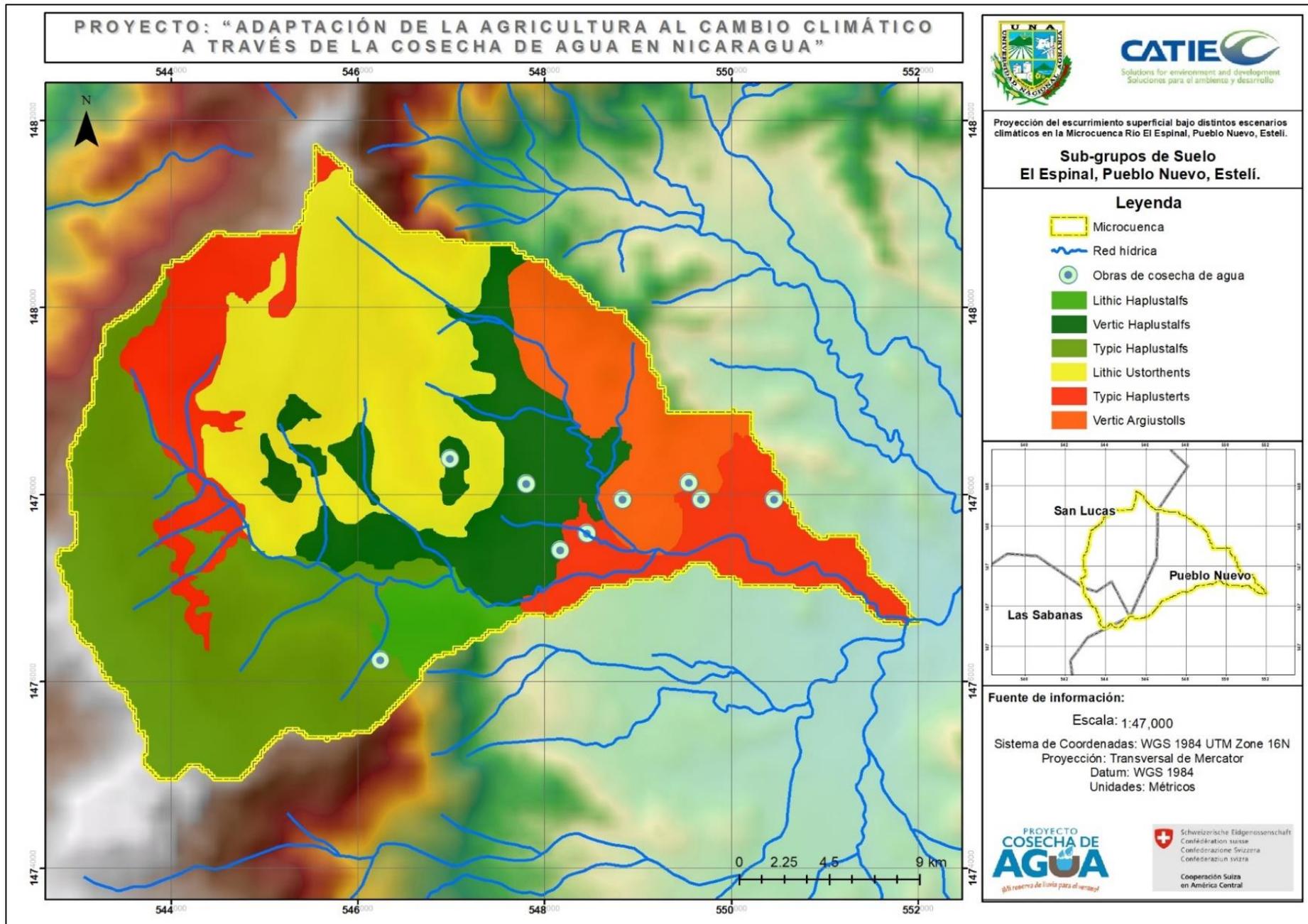


Figura 8. Subgrupos taxonómicos de la microcuenca del río El Espinal.

Cuadro 3. Órdenes de suelo de la microcuenca del río El Espinal

Orden	Subgrupo taxonómico	Área (km ²)	Porcentaje (%)
Entisol	Lithic Ustorthents	7.99	25.33
Vertisol	Typic Haplusterts	5.87	18.62
Molisol	Vertic Argiustolls	3.34	10.61
	Vertic Haplustalfs	4.63	14.70
Alfisol	Typic Haplustalfs	8.69	27.58
	Lithic Haplustalfs	1.00	3.16
Total		31.52	100

Vertisoles

En las planicies de la parte baja de la microcuenca es típico encontrar suelos vertisoles, sin embargo, también se presenta este orden de suelo en la parte alta. Estos están caracterizados por ser muy fértiles, con alto contenido de arcilla expandible que forman grietas que se abren y cierran con cambios de humedad. El subgrupo taxonómico de este orden presente en la unidad hidrográfica es Typic Haplusterts.

Perfil representativo del subgrupo taxonómico Typic Haplusterts

Perfil con características típicas del orden Vertisol, con el mínimo requerimiento de desarrollo. Presenta un régimen de humedad Ústico, el cual tiene humedad limitada, pero esto ocurre cuando las condiciones son adecuadas para el crecimiento de vegetación, es un suelo húmedo durante la estación lluviosa y seco por seis meses.



Figura 9. Paisaje representativo de un suelo Typic Haplusterts, comunidad Quebrada Abajo



Figura 10. Perfil de suelo Typic Haplusterts, comunidad Quebrada Abajo.

El perfil se encuentra localizado en la comunidad de Santa Elena en las coordenadas UTM 544128 y 1477404, con un relieve colinado con un promedio de pendiente del 23 %, con colores grisáceos, sin presencia de afloramientos rocosos, con ligero grado de erosión, drenaje superficial bueno. Este subgrupo ocupa 5.87 km² lo que representa el 18.62 % de la superficie total de la microcuenca. Actualmente estos suelos están siendo utilizados como potreros, áreas de pastos y vegetación arbustiva.

Cuadro 4. Descripción del perfil del subgrupo Typic Haplusterts, en la comunidad Quebrada Abajo, Pueblo Nuevo, Estelí

Horizontes	Descripción
A1 0-24 cm	Color negro rojizo en húmedo (5R2.5/1), con textura arcillosa, estructura fuerte de tipo masiva, consistencia en húmedo friable y en mojado adhesivo y plástico. Horizonte con límite suave; difuso, sin presencia de rocas en el perfil, pocos poros finos de tipo cavidades e intersticiales y presencia común de raíces finas. Presenta una capacidad de campo del 45.47 % y un punto de marchitez permanente de 24.58 %. pH medianamente ácido (6.21), contenido de materia orgánica alto (4.94 %), conductividad eléctrica 34.30 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (0.42 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Calcio (47.32 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Magnesio (9.52 meq.gr ⁻¹ suelo) y contenido de Sodio de 0.68 meq.gr ⁻¹ suelo. Capacidad de intercambio catiónico de 58.79 meq.gr ⁻¹ suelo.
A2 24+	Color café oscuro en húmedo (7.5YR3/2), con textura arcillosa, estructura fuerte de tipo masiva, consistencia en húmedo muy friable y en mojado muy adhesivo y muy plástica, sin presencia de rocas en el perfil, mucha presencia de moteados, muy pocos poros finos de tipo intersticiales, sin raíces. Presenta una capacidad de campo del 35.74 % y un punto de marchitez permanente de 19.32 %. pH medianamente ácido (6.10), contenido de materia orgánica alto (4.89 %), conductividad eléctrica de 46.20 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (0.43 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Calcio (26.16 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Magnesio (4.85 meq.gr ⁻¹ suelo) y contenido de sodio de 0.50 meq.gr ⁻¹ suelo. Capacidad de intercambio catiónico de 44.33 meq.gr ⁻¹ suelo.

Entisoles

Suelos jóvenes y superficiales, que no muestran ningún desarrollo definido. No presenta horizontes diagnósticos y presenta material parental regolítico inalterado. Por lo general están presentes en áreas con topografía inclinada a muy escarpada. En la microcuenca se identificó la presencia del subgrupo taxonómico *Lithic Ustorthents*.

Perfil representativo del subgrupo taxonómico Lithic Ustorthents

Perfil con contacto lítico dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral. Presenta un régimen de humedad Ústico, el cual tiene humedad limitada, pero esto ocurre cuando las condiciones son adecuadas para el crecimiento de vegetación, es un suelo húmedo durante la estación lluviosa y seco durante seis meses.



Figura 11. Paisaje representativo del suelo Lithic Ustorthents, comunidad Quebrada Abajo.



Figura 12. Perfil de suelo Lithic Ustorthents, comunidad Quebrada Abajo.

Cuadro 5. Descripción del perfil del subgrupo Lithic Ustorthents, en la comunidad Quebrada Abajo, Pueblo Nuevo, Estelí

Horizontes	Descripción
A 0-17 cm	Color café oscuro en seco (7.5YR3/2) y café muy oscuro en húmedo (10YR2/2), con textura arcillosa, estructura fuerte de tipo bloque subangular, consistencia en seco ligeramente duro; en húmedo friable; y en mojado adhesivo y plástico. Horizonte con límite difuso y suave, sin presencia de rocas dentro del perfil. Presenta muchos poros finos de tipo vesicular, y muchas raíces finas con muy pocas raíces medias. Presenta una capacidad de campo del 31.12 % y un punto de marchitez permanente de 16.82 %. pH ligeramente ácido (6.23), contenido de materia orgánica medio (2.42 %), conductividad eléctrica de 40.20 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (1.39 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo), alto contenido de Calcio (23.64 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo), alto contenido de Magnesio (5.64 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo) y un contenido de Sodio de 0.11 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo. Capacidad de intercambio catiónico de 38.67 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo.

C 17-26 cm	Color negro en seco (10 YR3/1) y café muy oscuro en húmedo (10YR 2/2), con textura franco-arcillosa, estructura moderada en forma de bloques subangulares, consistencia en seco dura; en húmedo friable; y en mojado adhesivo y plástico. Horizonte con límite abrupto ondulado, con presencia de muy pocos poros muy finos de tipo vesiculares, y muy pocas raíces muy finas. Presenta una capacidad de campo del 29.04 % y un punto de marchitez permanente de 15.70 %. pH ligeramente ácido (6.35), contenido de materia orgánica medio (2.42), conductividad eléctrica de 34.40 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (0.79 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Calcio (21.29 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Magnesio (4.75 meq.gr ⁻¹ suelo) y un contenido de Sodio de 0.29 meq.gr ⁻¹ suelo.
R > 26 cm	Material parental.

El perfil está localizado en la comunidad Limay en las coordenadas UTM 574827 y 1425986. Se encuentran en superficies a nivel, generalmente en pendiente de 0 a 5 %, de colores negros con textura arcillosa, imperfectamente drenados, permeabilidad imperfecta, sin evidencias visibles de erosión, sin presencia de afloramientos rocosos, fragmentos de rocas en la superficie o dentro del perfil. Este subgrupo ocupa 7.99 km² lo que representa el 25.33 % de la superficie total de la microcuenca. Actualmente está siendo utilizado pastos y vegetación arbustiva.

Alfisoles

Suelos con marcados procesos de translocación de minerales arcillosos por iluviación de arcilla, sin pérdida de bases (sodio, potasio, calcio o magnesio). La microcuenca presenta tres subgrupos taxonómicos dentro de este orden: Vertic Haplustalfs, Lithic Haplustalfs y Typic Haplustalfs.

Perfil representativo del subgrupo taxonómico Vertic Haplustalfs

Suelo que puede presentar una extensibilidad lineal de 6.0 cm o más entre la superficie del suelo mineral y una profundidad de 100 cm, o un contacto dénsico, lítico o paralítico, cualquiera que esté más somero. Presenta un desarrollo mínimo y un régimen de humedad Ústico, el cual tiene humedad limitada, pero esto ocurre cuando las condiciones son adecuadas para el crecimiento de vegetación, es un suelo húmedo durante la estación lluviosa y seco durante seis meses.



Figura 13. Paisaje representativo del suelo Vertic Haplustalfs comunidad Quebrada Abajo.



Figura 14. Perfil de suelo Vertic Haplustalfs, comunidad Quebrada Abajo.

Cuadro 6. Descripción del perfil del subgrupo Vertic Haplustalfs, en la comunidad Quebrada Abajo, Pueblo Nuevo, Estelí

Horizontes	Descripción
A1 0-23 cm	Color café rojizo oscuro en seco (5 YR 2.5/2) y negro en húmedo (7.5 YR 2.5/1), con textura arcillosa, estructura fuerte de tipo bloques angulares, consistencia en seco extremadamente duro; en húmedo muy firme; y en mojado muy adhesivo y muy plástico. Horizonte con un límite difuso y suave, muy poca presencia de rocas, presencia de pocos poros de tamaños finos, poca presencia de raíces de tamaño finas. Presenta una capacidad de campo de 38.62 % y un punto de marchitez permanente de 20.87 %. pH muy ligeramente ácido (6.28), contenido de materia orgánica medio (3.53 %), conductividad eléctrica de 45.70 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ alto contenido de Potasio (1.81 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Calcio (35.62 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Magnesio (8.4 meq.gr ⁻¹ suelo) contenido de Sodio de 0.29 meq.gr ⁻¹ suelo y capacidad de intercambio catiónico 51.46 meq.gr ⁻¹ suelo.
A2 23-33 cm	Color café rojizo oscuro en seco (5 YR 2.5/2) y negro en húmedo (7.5 YR 2.5/1), con textura arcillosa, estructura fuerte de tipo bloques angulares, consistencia en seco extremadamente duro; en húmedo muy firme; y en mojado muy adhesivo y muy plástico. Horizonte con un límite difuso y suave, muy poca presencia de rocas en el horizonte, presencia de pocos poros de tamaños finos, poca presencia de raíces de tamaño finas. Presenta una capacidad de campo de 38.62 % y un punto de marchitez permanente de 20.87 %. pH muy ligeramente ácido (6.28), contenido de materia orgánica medio (3.53 %), conductividad eléctrica de 45.70 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ alto contenido de Potasio (1.81 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Calcio (35.62 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Magnesio (8.4 meq.gr ⁻¹ suelo) contenido de Sodio de 0.29 meq.gr ⁻¹ suelo y capacidad de intercambio catiónico 51.46 meq.gr ⁻¹ suelo.
Bt 33_55 cm	Color café grisáceo muy oscuro en seco (10YR3/2) y café muy oscuro en húmedo (7.5YR2.5/3), con textura arcillosa, estructura fuerte y de tipo bloque angular, consistencia

	<p>en seco dura; en húmedo muy firme; y en mojado adhesivo y plástico. Horizonte con límite claro y suave. Presencia común de rocas en el horizonte, pocos poros finos de tipo intersticiales y pocas raíces gruesas. Presenta una capacidad de campo de 38.16 % y un punto de marchitez permanente de 20.87 %. pH medianamente ácido (5.76), contenido medio de materia orgánica (2.93 %), conductividad eléctrica de 46.70 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (1.92 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo), alto contenido de Calcio (24.78 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo), alto contenido de Magnesio (6.86 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo) y un contenido de Sodio de 0.49 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo y capacidad de intercambio catiónico de 38.67 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo.</p>
BC 55+	<p>Color café rojizo oscuro en seco (5YR3/3) y café rojizo oscuro en húmedo (5YR3/4), con textura arcillosa, estructura fuerte de tipo bloque angular, consistencia en seco extremadamente dura; en húmedo muy firme; y en mojado adhesivo y muy plástico, sin presencia de rocas en el perfil, con poca presencia de poros muy finos de tipo intersticiales, raíces muy pocas de tamaño medio. Capacidad de campo de 41.50 % y punto de marchitez permanente de 22.43 %. pH medianamente ácido (5.98), contenido de materia orgánica media (1.61 %), conductividad eléctrica de 44.40 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (1.82 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo), alto contenido de Calcio (36.48 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo), alto contenido de Magnesio (6.46 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo), un contenido de Sodio de 6.61 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo y capacidad de intercambio catiónico de 48.31 $\text{meq}\cdot\text{gr}^{-1}$ suelo.</p>

Este perfil se encuentra localizado en la comunidad Quebrada Abajo en las coordenadas UTM 545424 y 1477411. Se encuentra en un relieve colinado, con una pendiente del 29 % en una elevación de 961 msnm, con pedregosidad superficial de 20 a 30 %, el uso actual es potrero y con un grado de erosión moderado. Este subgrupo ocupa 4.63 km^2 lo que representa el 14.70 % de la superficie total de la microcuenca. Actualmente se encuentra utilizado como potrero.

Perfil representativo del subgrupo taxonómico Typic Haplustalfs

Perfil con características típicas de un Alfisol, con un desarrollo mínimo, o con el mínimo de requerimiento. Presenta un régimen de humedad Ústico, el cual tiene humedad limitada, pero esto ocurre cuando las condiciones son adecuadas para el crecimiento de vegetación, es un suelo húmedo durante la estación lluviosa y seco durante seis meses.



Figura 15. Paisaje representativo del suelo Typic Haplustalfs, comunidad El Chorro.



Figura 16. Perfil de suelo Typic Haplustalfs, comunidad El Chorro.

El perfil está localizado en la comunidad El Espinal en las coordenadas 546555 y 1477213, a 869 msnm. con una pendiente del 35 % y pedregosidad superficial del 50 %. Este subgrupo ocupa 8.69 km² lo que representa el 27.58 % de la superficie total de la microcuenca. Actualmente se encuentra utilizado con cultivos anuales.

Cuadro 7. Descripción del perfil del subgrupo Typic Haplustalfs, en la comunidad Quebrada Abajo, Pueblo Nuevo, Estelí

Horizontes	Descripción
A 0-9cm	Color café en seco (7.5YR 4/2) y café muy oscuro en húmedo (7.5YR 2.5/2), con textura franco-arcillosa, estructura suave de tipo bloques subangulares, consistencia en seco suelto; en húmedo friable; y en mojado adhesivo y plástico. Horizonte con límite claro suave, con poca presencia de rocas en el perfil, muy pocos poros de forma vesiculares y finos, raíces muy pocas y finas. Presenta una capacidad de campo de 27.60 % y punto de marchitez permanente de 14.92 %. pH medianamente ácido (5.59), contenido medio de materia orgánica (3.43 %), conductividad eléctrica de 32.30 $\mu\text{s}.\text{cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (3.29 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Calcio (18.67 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Magnesio (4,16 meq.gr ⁻¹ suelo), y contenido de Sodio de 0.61, capacidad de intercambio catiónico de 44.54 meq.gr ⁻¹ suelo.
B1 9-27 cm	Color café en seco (7.5 YR4/3) y negro en húmedo (7.5YR2.5/1), con textura franco-arcillosa, estructura moderada de tipo bloques subangulares, consistencia en seco ligeramente duro; en húmedo friable; y en mojado adhesivo y plástico. Horizonte con límite difuso y suave, muy poca presencia de rocas en el perfil, pocos poros de forma vesiculares finos, raíces en cantidades comunes y finas. Presenta una capacidad de campo de 28.35 % y un punto de marchitez permanente de 15.33 %. pH muy fuertemente ácido

	(5.00), contenido de materia orgánica pobre (1.97 %), conductividad eléctrica de 17.20 $\mu\text{s.cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (2.00 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Calcio (17.79 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Magnesio (4.19 meq.gr ⁻¹ suelo), un contenido de Sodio de 0.33 meq.gr ⁻¹ suelo y capacidad de intercambio catiónico de 41.61 meq.gr ⁻¹ suelo.
B2 27-46 cm	Color café en seco (7.5YR5/2) y negro en húmedo (7.5YR2.5/1), con textura franco arcillosos arenoso, estructura moderada y de tipo bloque subangulares, consistencia en seco suelto; en húmedo friable; y en mojado ligeramente adhesivo y ligeramente plástico. Horizonte con límite claro y suave, con presencia de rocas en el perfil, pocos poros de forma vesicular finos, raíces finas; y muy pocas de tamaño medio. Presenta una capacidad de campo de 24.57 % y punto de marchitez permanente de 13.28 %. pH extremadamente ácido (4.50), contenido de materia orgánica pobre (1.16 %) y conductividad eléctrica de 21.70 $\mu\text{s.cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (2.04 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de calcio (11.93 meq.gr ⁻¹ suelo), contenido de Sodio de 0.33 meq.gr ⁻¹ suelo y capacidad de intercambio catiónico de 31.54 meq.gr ⁻¹ suelo.
C > 46 cm	Color gris rosáceo en seco (7.5YR6/2) y café oscuro en húmedo (7.5YR3/2), con textura franco arcilloso arenoso, estructura moderada y de tipo bloques subangular, consistencia en seco ligeramente duro; en húmedo firme; y en mojado ligeramente adhesivo y ligeramente plástico. Horizonte con límite abrupto y suave, con presencia de pocas rocas en el perfil., poros de tipo vesicular tamaños finos y muy pocas raíces muy finas. Presenta una capacidad de campo de 29.88 % y punto de marchitez permanente de 16.33 %. pH muy fuertemente ácido (4.63), contenido de materia orgánica pobre (1.06 %) y conductividad eléctrica de 16.30 $\mu\text{s.cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (1.62 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Calcio (7.85 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Magnesio (2.29 meq.gr ⁻¹ suelo), un contenido de Sodio de 0.31 meq.gr ⁻¹ suelo y capacidad de intercambio catiónico de 16.24 meq.gr ⁻¹ suelo.

Perfil representativo del subgrupo taxonómico Lithic Haplustalfs

Perfil con contacto lítico dentro de los 50 cm de la superficie del suelo mineral, con un desarrollo mínimo, o con el mínimo de requerimiento. Presenta un régimen de humedad Ústico, el cual tiene humedad limitada, pero esto ocurre cuando las condiciones son adecuadas para el crecimiento de vegetación, es un suelo húmedo durante la estación lluviosa y seco durante seis meses.



Figura 17. Paisaje representativo del suelo Lithic Haplustalfs, Reserva Natural, Tepesomoto - La Pataste.



Figura 18. Perfil de suelo Lithic Haplustalfs, Reserva Natural, Tepesomoto - La Pataste.

Este perfil se encuentra en comunidad RN Tepe Somoto en las coordenadas UTM 547093 y 1476531, con una elevación de 930 msnm, en una pendiente del 48 % relieve colinado escarpado, en posición del relieve alta, grado de erosión severo y uso actual pasto con árboles dispersos. Este subgrupo ocupa un km² lo que representa el 3.16 % de la superficie total de la microcuenca. Actualmente ocupado con pastos con árboles dispersos.

Cuadro 8. Descripción del perfil del subgrupo Lithic Haplustalfs, en la Reserva Natural Tepesomoto- La Pataste

Horizontes	Descripción
A 0-17 cm	Color café en seco (10YR4/3) y café oscuro en húmedo (10YR3/3), con textura franco arcilloso, estructura moderada de tipo bloque subangular, consistencia en seco suave; en húmedo friable; y en mojado ligeramente adhesivo y ligeramente plástico. Horizonte con límite gradual y suave, con presencia de pocas rocas en el perfil, pocos poros de tipo vesicular y finos, muchas raíces de medias a gruesas. Presenta una capacidad de campo de 29.26 % y punto de marchitez de 15.82 %. pH ligeramente ácido (6.43), contenido de materia orgánica medio (3.13 %) y conductividad eléctrica de 66.60 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (1.59 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Calcio (25.78 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Magnesio (8.90 meq.gr ⁻¹ suelo), un contenido de Sodio de 0.07 meq.gr ⁻¹ suelo y capacidad de intercambio catiónico de 48.52 meq.gr ⁻¹ suelo.
Bt 17-30 cm	Colores amarillo rojizo en seco (7.5YR7/8) y café fuerte en húmedo (7.5YR5/8), con textura franco-arcillosa, estructura fuerte de tipo granular, consistencia en seco firme; en húmedo friable y ligeramente adhesivo, presencia de muchos poros grandes y finos de tipo

	tubular y vesicular. Presenta una capacidad de campo de 27.25 % y punto de marchitez permanente de 14.95. pH medianamente ácido (5.92), contenido de materia orgánica pobre (1.37 %) y conductividad eléctrica de 35.57 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (0.87 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Calcio (28.38 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Magnesio (15.84 meq.gr ⁻¹ suelo), un contenido de Sodio de 0.07 meq.gr ⁻¹ suelo y una capacidad de intercambio catiónico de 30.89 meq.gr ⁻¹ suelo.
R 30+	Material parental.

Molisoles

Suelos oscuros, ricos en materia orgánica y bases. Casi todos presentan un epipedón mólico y muchos tienen un horizonte argílico o nátrico o cámbico o cálcico. Presentan un grado variable de desarrollo del perfil, desde poco a bien evolucionado, con una alteración baja a media. La mayoría de los molisoles han evolucionado bajo una vegetación de pastos, aunque algunos lo han hecho bajo bosques. En la microcuenca se presenta el subgrupo taxonómico Vertic Argiustolls.

Perfil representativo del subgrupo taxonómico Vertic Argiustolls

Perfil que presenta características como grietas dentro de los 125 cm de la superficie del suelo de 5 mm a más, a través de un espesor de 30 cm o más por algún tiempo en años normales y puede presentar una extensibilidad lineal de 6.0 cm o más entre la superficie del suelo mineral y una profundidad de 100 cm, o a un contacto dénsico, lítico o paralítico, si esta menos profundo.

Presenta un horizonte argílico y un régimen de humedad Ústico, el cual tiene humedad limitada, pero esto ocurre cuando las condiciones son adecuadas para el crecimiento de vegetación, es un suelo húmedo durante la estación lluviosa y seco durante seis meses.



Figura 19. Paisaje representativo del suelo Vertic Argiustolls, comunidad Motolín.

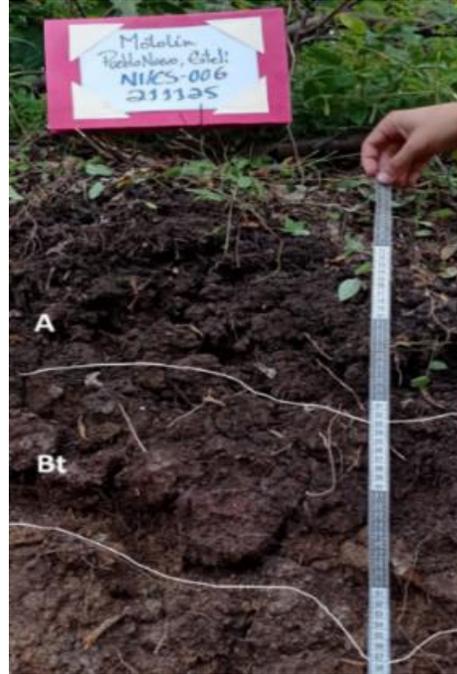


Figura 20. Perfil de suelo Vertic Argiustolls, comunidad Motolín.

Cuadro 9. Descripción del perfil del subgrupo Vertic Argiustolls en la comunidad Motolín, Pueblo Nuevo, Estelí

Horizontes	Descripción
A 0-33 cm	Color café muy oscuro en seco (10YR2/2) y gris muy oscuro en húmedo (10YR3/1), con textura arcillosa, estructura fuerte de tipo bloque angular, consistencia en seco dura; en húmedo friable; y en mojado adhesivo y plástico. Horizonte con un límite claro y suave, sin rocas en el perfil, con presencia de muchos poros de tamaño medios y finos de tipo intersticiales y pocos de tamaño fino y de tipo vesicular, raíces comunes de tamaño finas. Presenta una capacidad de campo de 42.25 % y punto de marchitez permanente de 22.84 %. pH fuertemente ácido (5.54), contenido de Materia Orgánica medio (2.47 %), conductividad eléctrica de 51.70 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, alto contenido de Potasio (0.89 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Calcio (36.88 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Magnesio (6.79 meq.gr ⁻¹ suelo), un contenido de Sodio de 0.63 meq.gr ⁻¹ suelo y capacidad de intercambio catiónico de 56.07 meq.gr ⁻¹ suelo.
Bt 33-58 cm	Color café oscuro en seco (7.5YR3/2) y café oscuro en húmedo (7.5 YR3/3), con textura arcillosa, estructura fuerte de tipo bloque angular, consistencia en seco dura; en húmedo friable; y en mojado adhesivo y plástico. Horizonte con límite claro y ondulado sin rocas. Presenta una cantidad común de poros de tipo intersticiales finos, y raíces pocas y muy finas. Con una capacidad de campo de 36.57 % y punto de marchitez permanente de 19.77 %. pH ligeramente ácido (6.23), con un contenido de materia orgánica pobre, conductividad eléctrica de 49.00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, contenido medio de Potasio (0.27 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Calcio (43.72 meq.gr ⁻¹ suelo), alto contenido de Magnesio (8.93 meq.gr ⁻¹ suelo), un contenido de Sodio de 0.63 meq.gr ⁻¹ suelo, capacidad de intercambio catiónico de 54.18 meq.gr ⁻¹ suelo.

Este perfil se encuentra ubicado en la comunidad Motolín en las coordenadas UTM 547773 y 1479561, con una elevación de 803 msnm un pendiente del 10 % con afloramientos rocosos de 0-10 % posición en el relieve ladera media, con un drenaje interno imperfecto, drenaje superficial bueno grado de erosión ligero y un uso actual de musáceas. Este subgrupo ocupa 3.34 km² lo que representa el 10.61 % de la superficie total de la microcuenca. Actualmente utilizado con cultivos anuales y perennes.

5.1.3. Uso actual del suelo

La microcuenca del río El Espinal se clasificó en ocho tipos de usos de suelo de los que predomina Pasto con un 37.83 %, café bajo sombra con un 18.88 %, luego Bosque Latifoliado con 16.47 %, los cultivos anuales que representan un 14.97 %, tacotal y arbusto 10.70 % y, por último, suelo sin vegetación, caserío y agua que en su suma ocupan el 1.15 % de la microcuenca para el 100 % del área total.

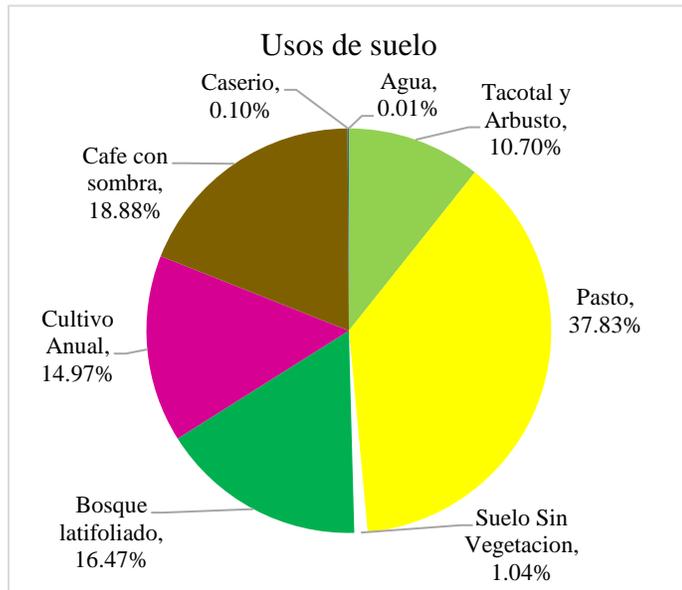


Figura 21. Uso actual del suelo de la microcuenca del río El Espinal.

Cuadro 10. Uso actual del suelo de la microcuenca del río El Espinal.

Usos del suelo	Área (km ²)	Porcentaje (%)	Código según SWAT
Bosque latifoliado	5.19	16.47	FRSD
Tacotal y arbusto	3.37	10.70	RNGB
Café con sombra	5.95	18.88	COFF
Cultivo anual	4.72	14.97	AGRR
Pasto	11.93	37.83	PAST
Suelo sin vegetación	0.33	1.04	BARR
Caserío	0.03	0.10	URLD
Agua	0.00	0.01	WATR
Total	31.52	100	

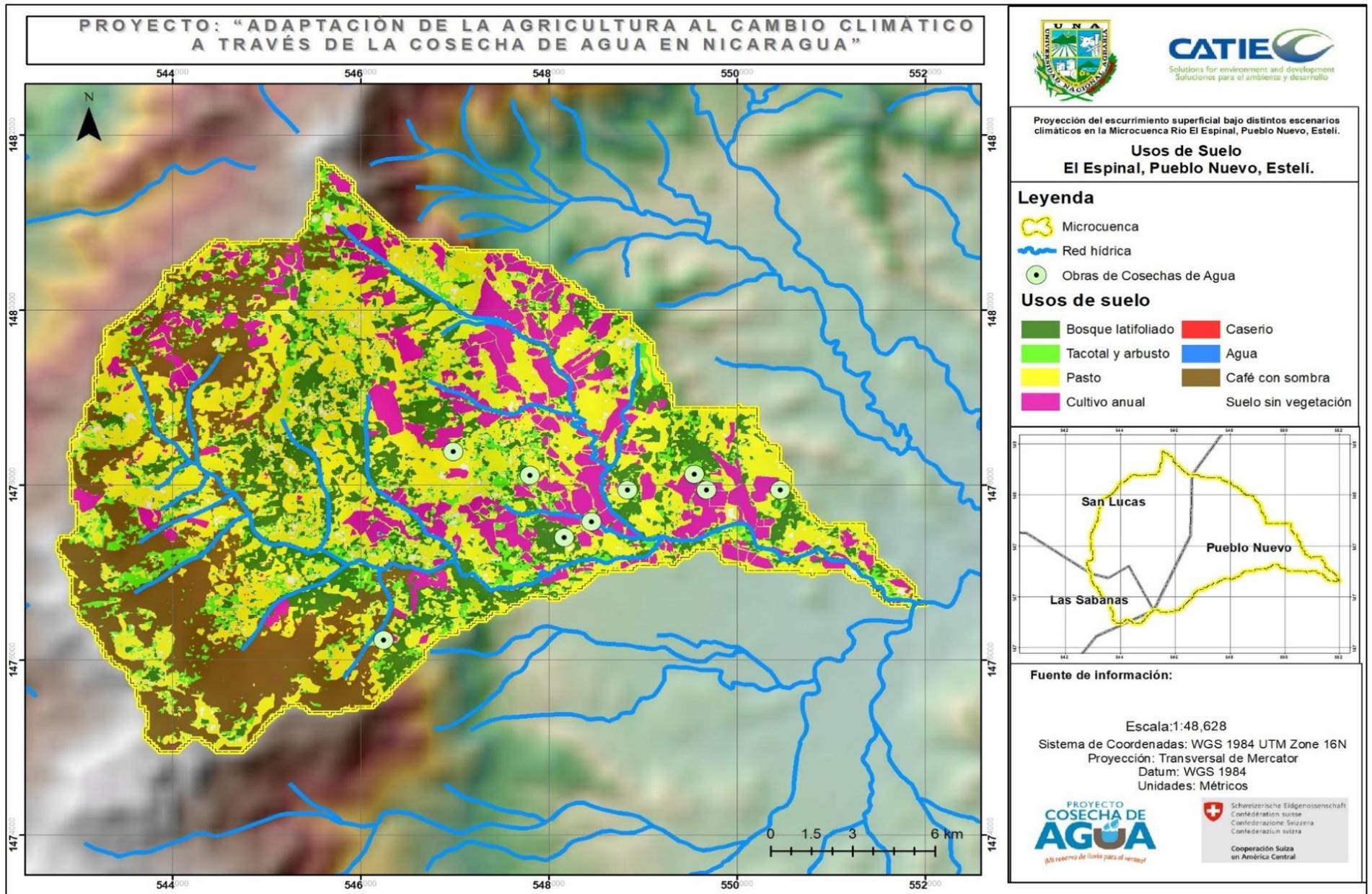


Figura 22. Usos de suelo de la microcuenca del río El Espinal

Pasto



Figura 23. Pasto

Este es el uso más predominante de la microcuenca, ocupando un área de 11.93 km², lo que representa el 37.83 % de la superficie total.

Esta superficie está destinada al pastoreo de equinos y bovinos, así como superficies con pasto natural.

A causa de la compactación por el pisoteo animal estos terrenos presentan un moderado coeficiente de infiltración.

Bosque Latifoliado



Figura 24. Bosque latifoliado

El segundo uso mayormente predominante con una extensión territorial de 5.193 km² que representa 17.47 % de la superficie total.

En la microcuenca se encuentran situados en terrenos con altas pendientes y laderas, que por su naturaleza son terrenos aptos para regeneración natural.

Presentes especies nativas de trópicos secos como Falso Roble (*Tabebuia rosea*), Sardinillo (*Tecoma stans*) etc.

Café con sombra



Figura 25. Café con sombra.

Cultivo integrado bajo término de sistema agroforestal, como método de adaptación climática en la microcuenca.

Ocupa un área de 5.95 km² que le hace acreedora del 18.88 % de la superficie total.

Generalmente presente en la microcuenca la variedad Catimor, entre con socios entre musáceas y Falso Roble.

Cultivo anual



Figura 26. Cultivo Anual.

Uso distribuido en toda la microcuenca, con 4.27 km² que le representa el 14.97 % de la superficie.

Siendo el uso más importante de la microcuenca, debido a que representa el ingreso económico en el territorio.

Este cultivo se distribuye en pendientes que van desde el 2 % hasta pendientes por encima del 30 %, más comúnmente se encuentra maíz, frijol, sorgo o millón y tabaco bajo sistemas de riego.

Tacotal y arbusto



Figura 27. Tacotal y Arbusto.

Uso que ocupa un área de 3.37 km² de la microcuenca y representa el 10.70 % de la superficie.

Terrenos en desuso y que presenta, proceso de regeneración natural, uso que se encuentra distribuido en diversas partes de la microcuenca.

5.1.4. Relación de la velocidad de infiltración con el uso del suelo

En el cuadro 11, se muestran resultados de la velocidad de infiltración media en periodo de verano en la microcuenca del río El Espinal, en cuanto a los usos actuales que se presenta en la clasificación supervisada realizada y el orden de suelo identificados en la clasificación de los suelos.

Cuadro 11. Velocidad de infiltración de la microcuenca del río El Espinal

Uso	N	Orden de suelo	Inf.mm/h
Café con sombra	3	Vertisol	61.65
Pasto	4	Alfisol	52.05
Bosque	4	Molisol	40.19
Cultivo anual	3	Alfisol	47.23

Cuadro 12 Tasa media de infiltración y su clasificación

Tasa de infiltración mm h⁻¹	Clasificación
<508	Muy rápido
152-508	Rápido
50-152	Moderadamente rápido
15-50	Moderada
5-15	Modernamente Lenta
1.5-5	Lenta
0.003-1.5	Muy lenta
>0.04	Impermeable

Fuente: FAO, 1984, modificado por Mendoza, 2014

El uso del suelo café con sombra, presenta una velocidad infiltración media 76.22 mm.h⁻¹ bajo condiciones de suelos vertisoles, presenta la característica de ser suelos pocos desarrollados y pocos profundos con textura arcillosas, el cual presentan agrietamientos en época de verano debido a la contracción de las partículas de arcilla. También este uso se encontró en suelos molisoles, con textura de francos arcillosos y profundidad baja.

Además de las características antes mencionas por la textura y tipo del suelo, posee la velocidad de infiltración moderadamente rápida con relación a los otros usos; que también podría estar ligada al recubrimiento de hojarascas que detienen el impacto directo del agua al suelo, disminuyendo su velocidad de escurrimiento y aumentando la cantidad de materia orgánica en los suelos, según la FAO (2005), un buen manejo de la tierra debería favorecer la infiltración.

“Los sistemas de cultivos que ofertan mayor cobertura al suelo, presentan mayores contenidos de materia orgánica, tasa rápida de infiltración de agua en el suelo y menores tasas de erosión” (Llanes et al. 2019, p. 29)

En el uso de suelo de pasto encontramos una velocidad de infiltración media de 52.05 mm.h⁻¹ situándose como el segundo uso que presenta mayor infiltración en la microcuenca. Este uso lo encontramos en suelos vertisoles y alfisoles, que presentan texturas arcillosas, pocos profundos y baja presencia de poros, es importante destacar que una de las

características de estos suelos es el agrietamiento que podría contribuir a la infiltración observada. FAO (1984) cataloga el pasto como uso con infiltración moderada.

Según Yáñez et al. (2018), este comportamiento de la infiltración en uso de pasto podría vincularse a la cantidad de excrementos de ganado distribuidos a lo largo de toda el área, los cuales son una de las fuentes principales de materia orgánica en suelos intervenidos. Destacando que en los suelos muestreados se encontraron contenido medios de materia orgánica de 3.19 % y alto contenido de materia orgánica de 4.19 %.

Por otro lado, el uso de suelo bosque presenta una velocidad de infiltración media de 37.98 mm.h⁻¹, que puede estar vinculado a la baja presencia de poros en el suelo evidenciados mediante el muestreo de suelo realizado en campo, que es una característica de suelos vertisoles, donde se encontró este tipo de uso. Del mismo modo, son suelos con alto contenido de arcilla y de bajo desarrollo, que pueden presentar limitaciones del desarrollo radicular de la vegetación.

Cuando la porosidad de la superficie del suelo es muy baja como para aceptar el agua de lluvia o la porosidad del subsuelo es demasiado reducida para permitir su percolación (o sea, la permeabilidad es demasiado lenta), entonces la infiltración será limitada y el agua de lluvia será perdida como escorrentía. (FAO, 2005, p. 50)

La porosidad de la superficie del suelo puede haber sido reducida al obstruirse los poros con partículas desprendidas de los agregados de suelo bajo el impacto de las gotas de lluvia o por la deposición de esas partículas sobre la superficie del suelo formando un encostramiento o un sellado impermeable. La porosidad del suelo subsuperficial puede ser naturalmente. (FAO, 2005, p. 50)

Los cultivos anuales presentan una velocidad de infiltración media de 35.2 mm.h⁻¹ y se podría expresar que la baja infiltración en relación con los otros usos del suelo. Esto podría vincularse a la alta carga de actividades agrícolas que se da en este lugar; lo cual, se refleja en la compactación de los suelos, disminuyendo su capacidad de infiltración.

También es importante mencionar que, este uso se encontró en suelos molisoles, pocos profundos con alto contenido de arcilla, que puede ser un factor influyente en la baja infiltración.

La labranza afloja el suelo. Sin embargo, la labranza a su vez rompe agregados y deteriora la estructura del suelo creando el potencial para el desarrollo de compactación, encostramiento superficial, y pérdida de poros continuos conectados con la superficie. Suelos compactados poseen menos espacio poroso, lo que determina menores velocidades de infiltración. Suelos que tienden a formar costras superficiales, que sellan la superficie del suelo, pueden presentar velocidades de infiltración severamente aminoradas. (López, 2008, p. 20)

5.1.5. Balance hídrico

Se presentan los resultados medios de balances hídricos obtenidos de los datos del registro históricos (2000-2021), escenarios climáticos RCP 2.6 y RCP 8.5; del mismo modo que la comparación general de estos escenarios.

Escenario climático del registro histórico

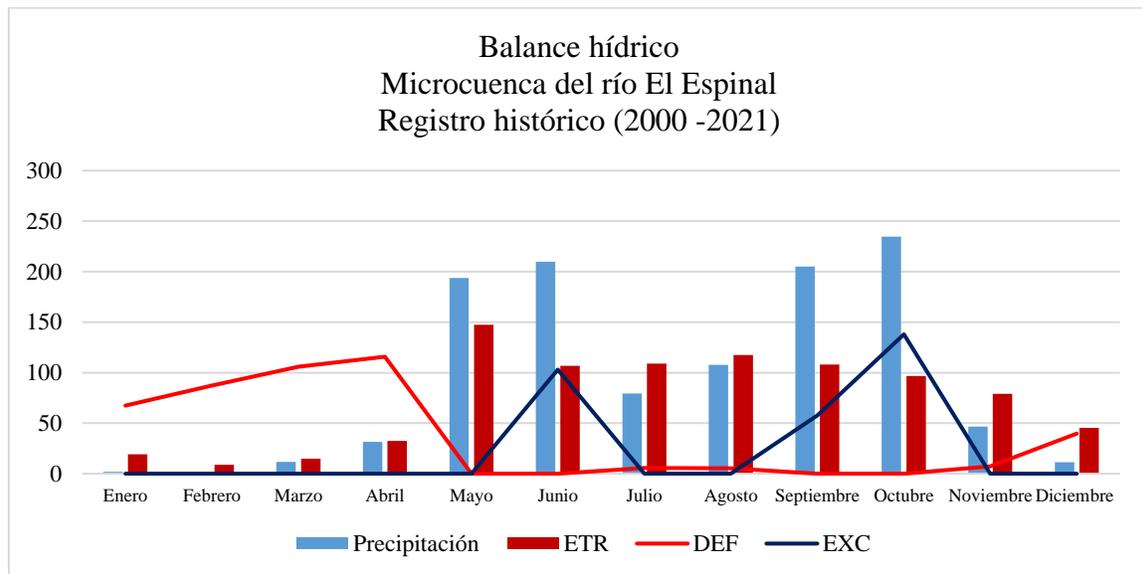


Figura 28. Balance hídrico del registro histórico periodo 2000-2021 microcuenca del río El Espinal.

En la figura 28, se muestra el balance hídrico del registro histórico del periodo 2000-2021 de la microcuenca del río El Espinal, presentando precipitaciones mínimas en los primeros meses del año, las cuales oscilan entre 2.03 mm en enero y 1.29 mm en febrero, teniendo un aumento en marzo con 11.7 mm y abril con 31.44 mm. Al iniciar el periodo lluvioso, a partir de mayo, hay una creciente de 193.53 mm llegando hasta los 209.71 mm en junio, sin embargo, con la llegada del periodo canicular que es la temporada con las temperaturas más altas, hay una disminución de las precipitaciones llegando a los 79.29 mm en Julio, al dar inicio al período de postrera en septiembre con precipitaciones de 205.08 mm y máximas de 234.62 mm en octubre.

La evapotranspiración real alcanza su límite en los meses mayo y junio debido al aumento de las temperaturas y precipitaciones, propiciando los procesos de transpiración de las plantas, en estos meses, presentando valor máximo de 147.5 mm en mayo. Los valores mínimos se presentan en los meses secos con 8.97 mm en febrero y 14.79 mm en marzo debido a la disminución de la humedad en el suelo.

En la época seca del año se presenta el mayor déficit de 115.77 mm en el mes de abril debido a que es el mes con mayores temperaturas. A mediados de la época lluviosa también se presenta un déficit mínimo entre julio y agosto de 5.7 mm esto se atribuye al periodo canicular.

El excedente se muestra principalmente en los meses de mayo, junio, septiembre y en octubre, debido a que las precipitaciones en estos meses son mayores indicando que la cantidad de agua disponible es mayor principalmente en el mes de octubre con 137.92 mm lo que beneficia al período de postrera.

Escenario climático futuro RCP 2.6

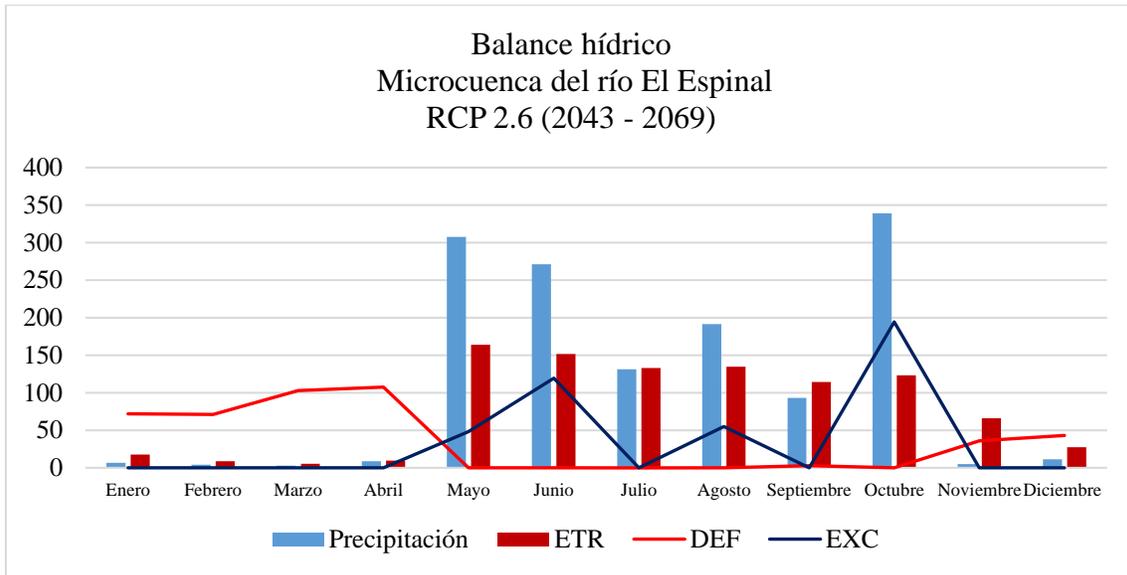


Figura 29. Balance hídrico RCP 2.6 periodo 2043 – 2069 microcuenca del río El Espinal.

En la figura 29, se muestra el balance hídrico del escenario climático 2.6 de la microcuenca del río El Espinal, presentando una época seca más prolongada en comparación con los datos históricos, siendo para este escenario desde diciembre hasta marzo, con precipitaciones mínimas que oscilan entre 2.94 mm y 8.66 mm, teniendo un aumento a partir del mes de mayo, el cual presenta una creciente de 307.8 mm, disminuyendo en el siguiente mes de julio con 131.17 mm, marcando el periodo canicular.

Los meses más lluviosos se reflejan en mayo con 300 mm, junio 271 mm y octubre con 339.02 mm; luego en noviembre las precipitaciones disminuyen llegando hasta 7.75 mm. Según el V informe del IPCC (2014) habrá un aumento en la ocurrencia de eventos climáticos extremos como tormentas a lo que se puede atribuir el incremento de las precipitaciones para este escenario climático.

La evapotranspiración real alcanza su máximo en los meses mayo, junio, julio y agosto debido al aumento de las precipitaciones en estos meses, siendo el valor máximo de 163.88 mm en mayo y 151.51 mm en junio, los valores mínimos se presentan en marzo con 5.37 mm y febrero con 8.57 mm que se consideran como meses secos.

En la época seca del año puede notarse que hay un déficit debido a que las precipitaciones en estos meses son mínimas principalmente en abril que presenta el mayor déficit de 107.48 mm que en comparación con los datos históricos es menor, dentro de la época lluviosa también se presenta un déficit mínimo en septiembre de 2.82 mm provocando una prolongación en la canícula, lo cual en el histórico se muestra con normalidad en los meses de julio y agosto atribuido a este periodo.

Escenario climático futuro RCP 8.5

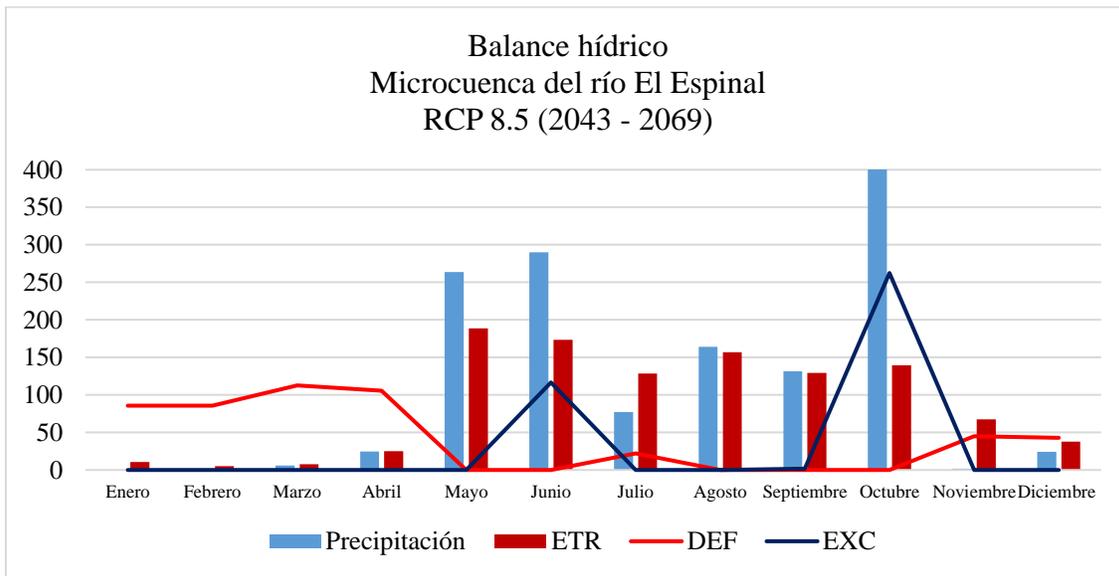


Figura 30. Balance hídrico RCP 8.5 periodo 2043 – 2069 microcuenca del río El Espinal.

En el escenario RCP 8.5, se nota un aumento en las precipitaciones en los meses de mayo y junio; así como, en el mes de octubre un pico máximo de precipitaciones de 401.87 mm. Las precipitaciones se verán redistribuidas de manera no uniforme durante la estación lluviosa y se observará más marcado el periodo canicular. Este comportamiento puede estar vinculados a los posibles eventos climáticos más recurrentes, de los que habla el IPCC en VI informe publicado en 2021, a corto plazo experimentamos fuertes sequías y lluvias torrenciales. A medio plazo viviremos una progresiva desertización de grandes regiones planetarias. (Pelegrí, 2021)

En cuanto al déficit en el RCP 8.5 es notorio inclusive hasta entre los meses de julio y agosto con relación al balance hídrico histórico y el RCP 2.6, meses donde se refleja de forma más prolongada y evidente el periodo canicular. El déficit se marcará casi en 7 meses del año, solamente se presentará exceso en los meses de mayo, junio y octubre con el valor máximo que alcanzará una media de 262.39 mm.

Con referencia al balance hídrico histórico se evidencia un aumento de al menos 100 mm en todo el periodo lluvioso, aunque no distribuido uniformemente; a pesar de ello podrá ser beneficioso en cuanto al escurrimiento superficial y para las obras de cosechas de agua, así también para el posible mantenimiento del caudal.

Comparación de los escenarios climáticos

En la figura 31, se presenta la comparación del balance hídrico histórico con los RCP 2.6 y RCP 8.5.

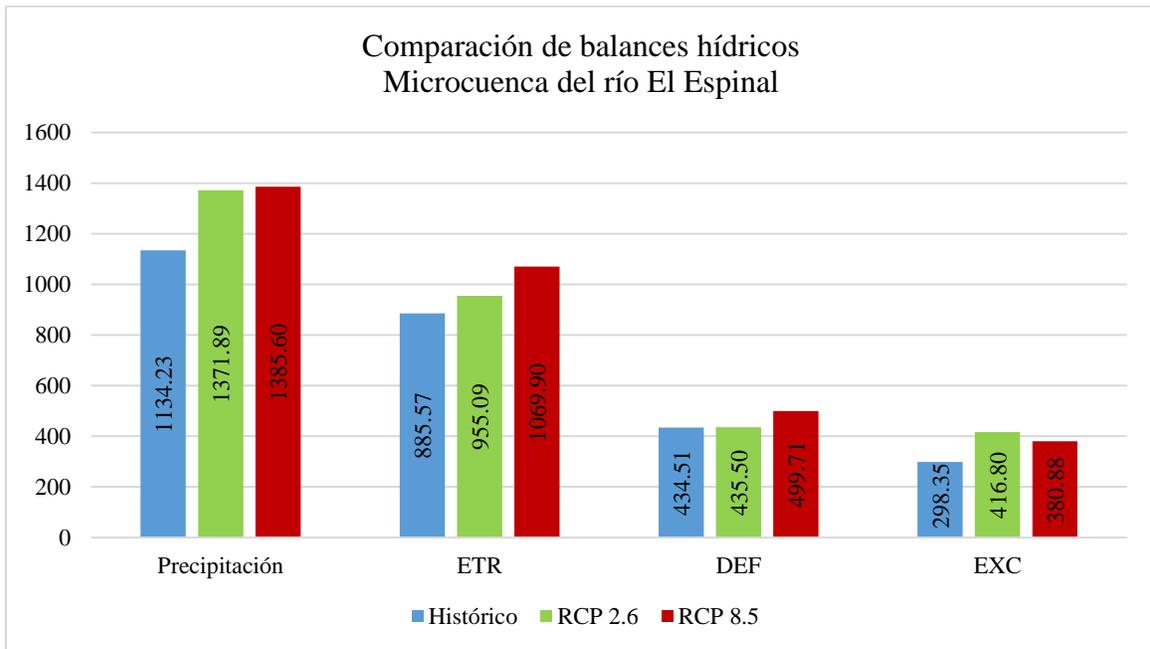


Figura 31. Comparación general de balances hídricos.

Al comparar los balances hídricos se percibe un aumento en las precipitaciones de los escenarios climáticos RCP 2.6 y RCP 8.5 en comparación a los datos históricos del periodo 2000-2021; sin embargo, la distribución varía según los meses, en el caso del registro histórico estas inician su incremento a partir de marzo y disminuyen en julio con la llegada del periodo canicular, siguen su aumento en agosto hasta octubre para favorecer la postrera y disminuyen nuevamente en noviembre.

En el escenario RCP 2.6 el cambio es notorio presentando precipitaciones casi nulas en los primeros meses hasta abril y teniendo un incremento brusco en mayo descendiendo hasta la llegada de la canícula en julio. El período de postrera se verá afectado por una baja en el mes de septiembre, teniendo un comportamiento similar en el RCP 8.5 pero con un periodo canicular más marcado y mayores precipitaciones en los meses de junio y octubre.

Al analizar las variables de precipitación según los datos históricos, en este periodo son menores que en los escenarios climáticos futuros, esto puede atribuirse al aumento de eventos climáticos como huracanes, tormentas tropicales y otros; provocados por el cambio climático. Respecto a la evapotranspiración real se puede determinar que en el registro histórico y el RCP 2.6 tienen un déficit de agua con valores similares, siendo mayor el déficit que se presenta en el RCP 8.5, ya que este escenario presenta mayores emisiones de Gases de efecto invernadero.

Por otra parte, esto indica que habrá una mayor cantidad de agua disponible para el escenario climático RCP 2.6 debido a que el exceso es mayor en comparación con el registro histórico y el RCP 8.5; sin embargo, el periodo de distribución de las precipitaciones varía en comparación al registro histórico; lo cual, puede afectar en las etapas de producción y la estructura de las cosechas de agua ya que la mayor concentración de lluvias puede darse en un sólo mes.

5.2. Comportamiento de los caudales

A continuación, se presentan los resultados producto del análisis de los gráficos de hidrograma histórico e hidrograma del año 2021, tomando en consideración eventos climáticos significativos, tales como huracanes, sequías, tormentas tropicales e influencia del fenómeno El Niño y La Niña, igual que el hidrograma futuro basado en las trayectorias de concentración representativas RCP 2.6 y RCP 8.5.

5.2.1. Escenario histórico

En el siguiente hidrograma (figura 32), se muestran los datos históricos de caudal medio anual del punto de desemboque de la microcuenca (punto 6) que comprenden el periodo del año 2003 hasta el año 2021. Se reflejan los años que presenta una baja en el caudal en referencia al primer tercil (T1) indicativo de caudales menores a $0.37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, el valor mínimo registrado es de $0.22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en el año 2004, siendo un año afectado por el fenómeno climático El Niño. Según los registros históricos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) que datan de los años 50 hasta la actualidad (2022), los años con sequía severa fueron el 2009 y 2014, además del 2015 que presentó sequía moderada.

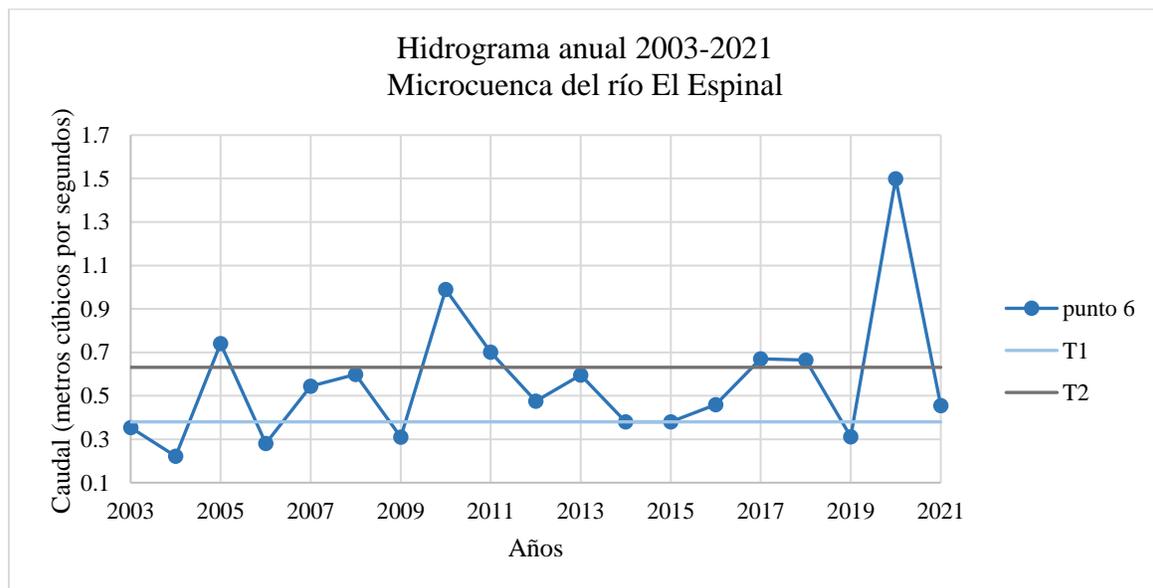


Figura 32. Hidrograma anual periodo 2003-2021 de la microcuenca del río El Espinal.

Fuente: Propia

Algunos de los caudales que se encuentran entre el primer y segundo tercil fueron afectados por eventos climáticos entre ellos la tormenta tropical Alma en el 2008; huracán Félix en el 2007, que también es precedido por la sequía presentada en el 2006. El año 2016 fue considerado como año de sequía moderada, pero también fue afectado por el huracán Otto lo cual pudo influir para mantenerse entre el rango de los terciles presentando el caudal mínimo de $0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

En referencia al segundo tercil (T2) indicativo de caudales mayores a $0.63 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en el año 2005 se vieron afectaciones por los huracanes Adrián, Beta y Stan por lo que se presenta un aumento mínimo en el caudal, luego hay un incremento en el año 2010 atribuido a la tormenta tropical Matthew. En el año 2017 intervino el huracán Nate, al finalizar se muestra el pico más alto con caudales de $1.49 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en el año 2020 que fue impactado por los huracanes Eta de categoría 4 e Iota de categoría 5, afectando aproximadamente el 60 % del territorio, en particular la Región Autónoma de la Costa Caribe Norte (RACCN) según la Oficina de Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios (2021).

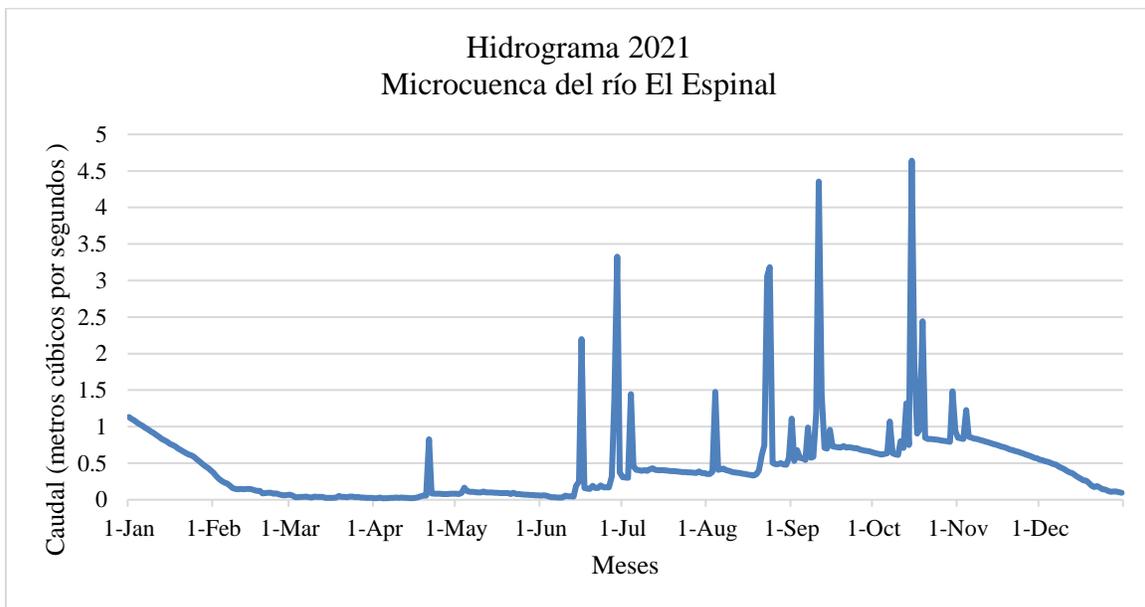


Figura 33. Hidrograma 2021 de la microcuenca del río El Espinal.

En la figura 32 se presenta el hidrograma del año 2021 en el punto de desemboque (punto 6) de la microcuenca del río El Espinal, en los primeros meses de enero a junio se muestran caudales con valores muy bajos siendo el mínimo de $0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en el mes de abril, a partir de la segunda quincena de junio hay un aumento en el caudal de $3.32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, de igual forma que se presenta en los siguientes meses hasta noviembre con caudales máximos de $1.44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en julio, $3.18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en agosto, $4.35 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en septiembre y en octubre se muestra el pico más alto con un caudal de $4.64 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en la microcuenca que favorecería al escurrimiento superficial ligado a la pendiente media y a que posee un tiempo de concentración bajo.

El aumento repentino de los caudales reflejados por los picos más altos en el hidrograma podría ser un indicativo del impacto que tendrá la variabilidad climática sobre las obras. En caso de que las precipitaciones se distribuyan de forma uniforme, resultaría benéfico para la recarga de agua de las obras de cosecha de agua; en caso contrario, podría provocar una alteración en la estabilidad por superar su capacidad de almacenamiento de agua y por ende la infraestructura de estas podría colapsar o sufrir algún tipo de daño.

Los datos presentados en el cuadro 13 son caudales circulantes tomados mensualmente lo que hace referencia a que, si se presentó un evento de precipitación en la microcuenca luego del levantamiento de información, estos pudieron aumentar en cualquiera de los puntos de monitoreo por lo cual para el punto de desemboque solo se muestran caudales en los meses de noviembre con $0.0100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y diciembre con $0.0072 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Estos datos se presentan con el fin de tomar en referencia resultados obtenidos en campo y comparar los caudales generados con el modelo hidrológico SWAT.

Cuadro 13. Datos de caudales circulantes de la microcuenca del río El Espinal

Punto	Caudal ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)									
	2021					2022				
	23/08	24/08	20/11	24/11	02/12	24/01	31/01	21/02	11/03	22/04
1	0.0054	0.0174	-	0.0056	0.0075	0.0024	0.0049	0.0014	-	0.0002
2	0.0016	0.0073	-	0.0013	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	-	0.0020	-	0.0023	0.0049	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	-	0.0699	-	-	0.0000	0.0038	0.0000	0.0025	0.0000	0.0000
5	-	-	-	0.0038	0.0024	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	-	-	-	0.0100	0.0072	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

5.2.2. Escenarios futuros

En la figura 34 se presenta un hidrograma comparativo de los caudales en el periodo 2043-2069 para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5. Se puede observar el comportamiento constante del caudal para el RCP 2.6 con una media anual del $0.82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ hasta el año 2055 donde se observa una disminución no tan marcada, pero si constante hasta el año 2064, para experimentar un aumento en la media anual de casi $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ hasta el año 2069, este comportamiento atribuido al aumento de las precipitaciones.

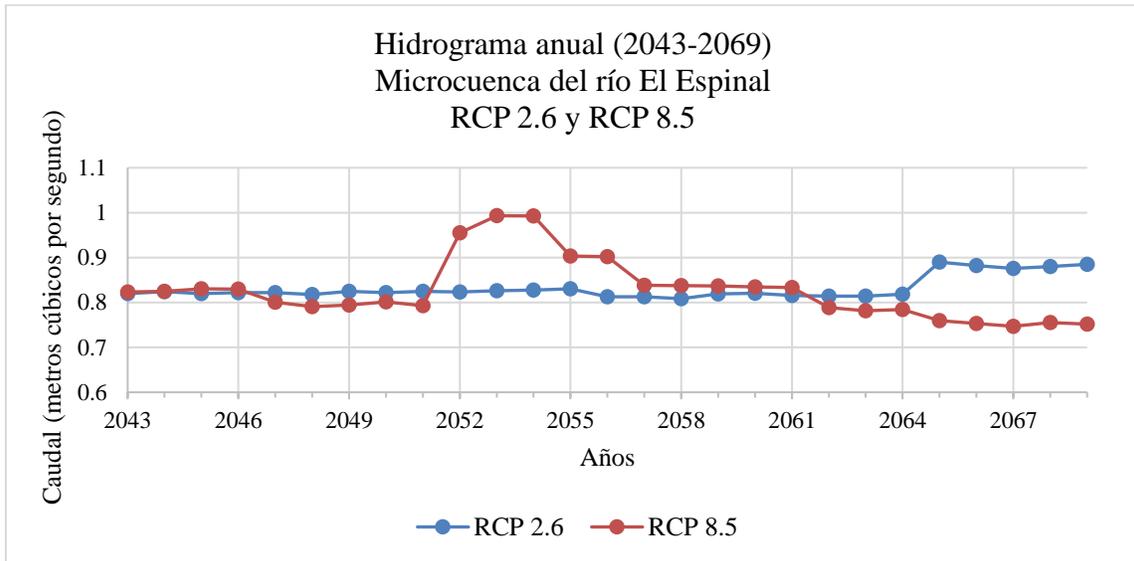


Figura 34. Hidrograma anual periodo 2043-2069 RCP 2.6 y RCP 8.5 de la microcuenca río El Espinal.

Bajo las condiciones del escenario climático RCP 8.5 se puede observar que entre los años 2043 al 2051 sigue la misma tendencia, se espera una media anual de $0.75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. A partir de los años 2052 al 2057 presenta un aumento en el caudal de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que muy probablemente estaría vinculada a eventos climáticos severos como huracanes, tormentas tropicales y otros, posteriormente se observa que desde el año 2058 se establecerá una media de $0.85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ hasta el año 2061 y desde este año hasta el 2069 se observa la disminución de la media anual de $0.75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que es donde según IPCC (2021) se notaran los cambios.

5.2.3. Influencia de las unidades de respuesta hidrológica sobre el escurrimiento superficial

La microcuenca del río El Espinal presenta 171 unidades de respuesta hidrológica (URH) (Figura 35), de las cuales destacan URH con usos agropecuarios, como cultivos de granos básicos, pastos, áreas de potreros con árboles dispersos y café bajo sombra; en pendientes moderadamente escarpadas a fuertemente escarpadas (mayores al 15 %); en suelos Lithic Ustorthents y Typic Haplustalfs.

Las URH que mayor aporte generan en el escurrimiento superficial (Figura 36) presentan combinaciones de usos de cultivos anuales o superficies desprovistas de vegetación, en suelos del subgrupo Vertic Haplustalfs, Typic Haplustalfs y Typic Haplusterts; y en pendientes moderadamente escarpadas a fuertemente escarpadas.

En el cuadro 14 se detalla el escurrimiento medio de cada subunidad según los registros históricos y los escenarios RCP2.6 y RCP 8.5; en el cuadro 15 se presentan los resultados de nueve obras de cosecha de agua establecidas dentro de la microcuenca, y las unidades de respuesta hidrológica (URH) correspondiente.

Cuadro 14. Escurrimiento superficial en milímetros por subunidad, microcuenca El Espinal

Subunidad	Área (km ²)	Escurrimiento superficial (mm)		
		Histórico	RCP 2.6	RCP 8.5
1	6.49	143.19	293.71	307.62
2	0.97	167.02	328.04	341.63
3	2.92	170.90	334.77	348.27
4	9.05	127.93	269.22	285.31
5	8.93	191.97	360.47	376.69
6	3.16	176.21	332.38	351.28
Total	31.53	159.24	314.33	329.97

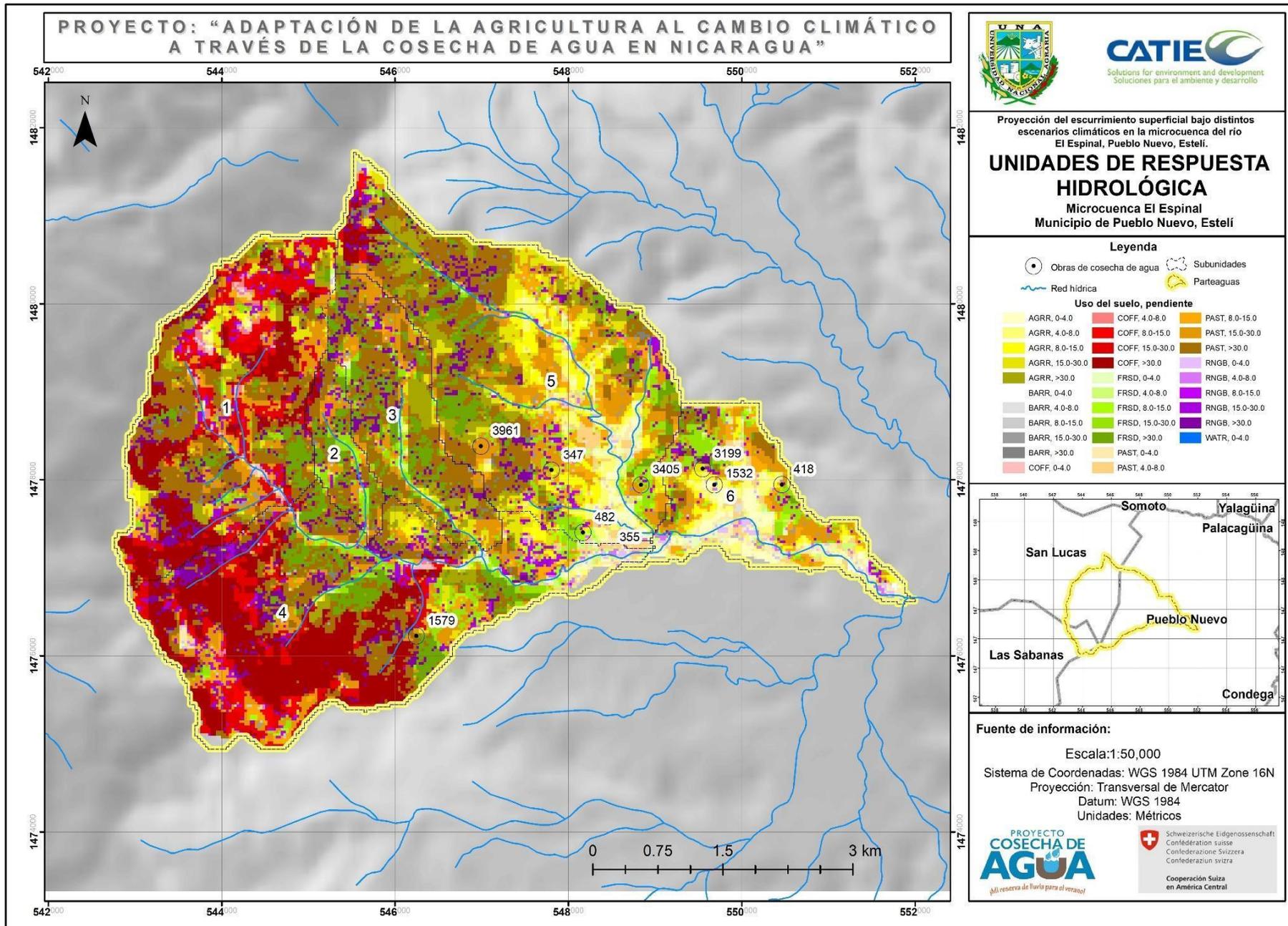


Figura 35. Unidades de Respuesta Hidrológica de la microcuenca del río El Espinal, Pueblo Nuevo, Estelí

Cuadro 15. Aporte de las unidades de respuesta hidrológicas en las Obras de cosecha de agua establecidas en la microcuenca del río El Espinal

Código	E scorrimiento superficial (mm)			Sub-unidad	Unidad de respuesta hidrológica		
	Histórico	RCP 2.6	RCP 8.5		Uso	Suelo	Pendiente
347	353.38	519.19	601.38	5	Agricultura	Vertic Haplustalfs	15-30%
355	296.97	512.77	518.53	5	Agricultura	Typic Haplusterts	0-4%
418	136.38	255.51	298.54	6	Bosque deciduo	Typic Haplusterts	8-15%
482	353.38	591.19	601.38	5	Agricultura	Vertic Haplustalfs	15-30%
1532	159.29	323.2	332.33	6	Pasto	Typic Haplusterts	0-4%
1579	120.36	258.47	278.56	4	Pasto	Typic Haplustalfs	>30%
3199	236.11	417.99	432.63	6	Agricultura	Vertic Argiustolls	15-30%
3405	98.51	199.23	231.75	5	Bosque deciduo	Vertic Argiustolls	15-30%
3961	203.32	387.94	400.5	5	Pasto	Vertic Haplustalfs	15-30%

Con el escenario histórico, destaca el aporte de la subunidad 5, siendo de 191.97 mm, en donde las unidades de respuestas hidrológicas predominantes corresponden a las superficies agropecuarias con la velocidad media de infiltración más baja con 35.2 mm.h^{-1} en pendientes moderadamente escarpadas en suelos Vertic Haplustalfs y Lithic Ustorthents, caracterizados por presentar texturas franco-arcillosas a arcillosas que reducen la infiltración del agua en el suelo, y por ende favorece el escurrimiento superficial.

La subunidad que genera menor aporte en el escurrimiento superficial bajo el escenario histórico es la subunidad 4 con 127.93 mm, dominada por unidades de respuestas hidrológicas con uso agroforestal (café bajo sombra), y bosques latifoliados en pendientes moderadamente escarpadas en suelos Typic Haplustalfs. Este subgrupo taxonómico está caracterizado por ser suelos profundos con texturas predominantes franco arcillosas. Sin embargo, el uso actual de carácter agroforestal propicia las condiciones para que el desplazamiento del agua sobre la superficie sea retardado, favoreciendo la infiltración que en los análisis realizados para este uso la velocidad media es de 76.22 mm.h^{-1} , en consecuencia, reduciendo el escurrimiento.

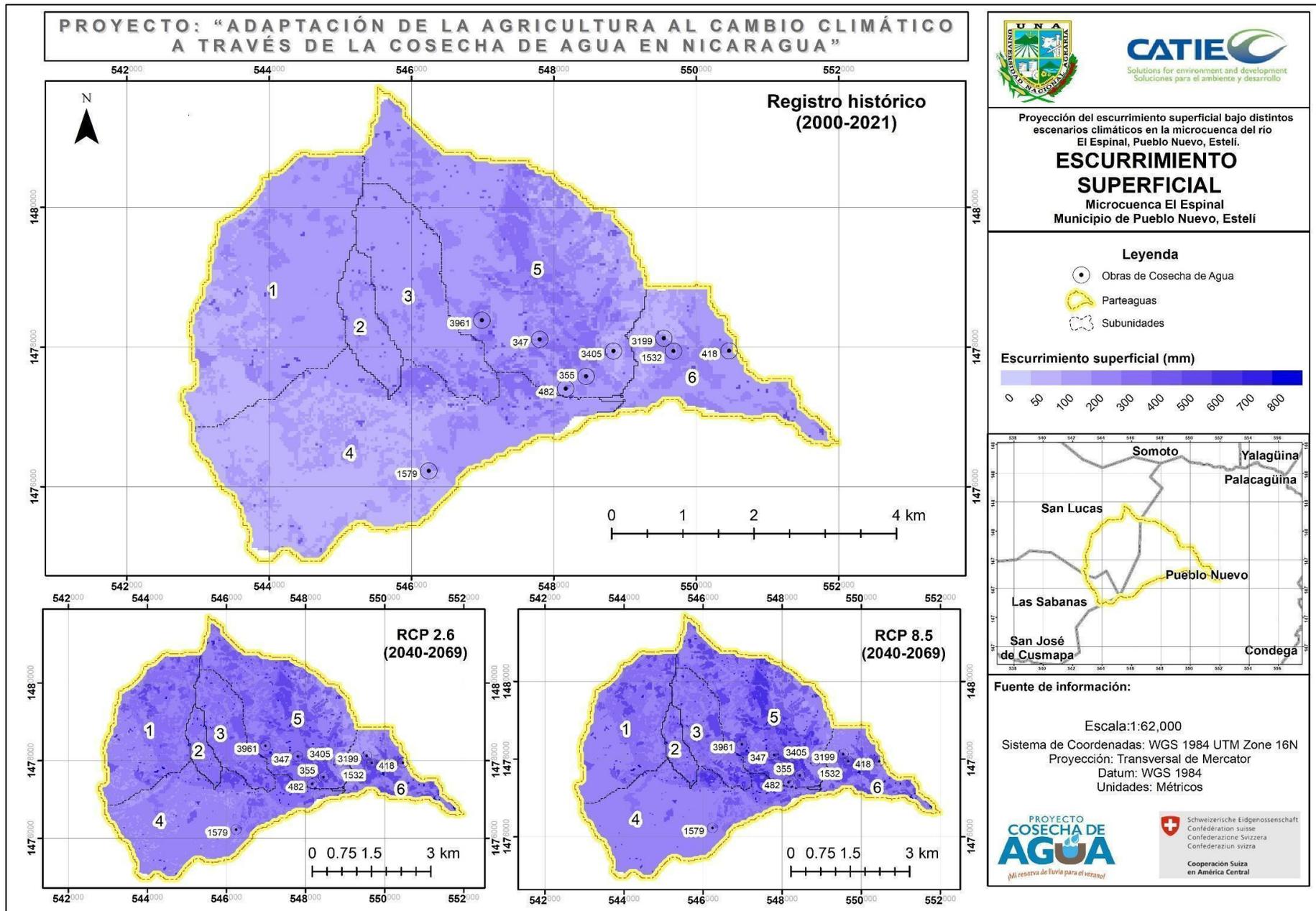


Figura 36. Comportamiento del escurrimiento superficial en la microcuenca del río El Espinal, Pueblo Nuevo, Estelí.

Pérez et. al (2005) afirma que, “en los sistemas agroforestales de café bajo sombra, el escurrimiento superficial depende más de la cantidad que de la intensidad de la lluvia”. Debido a la cobertura forestal que presentan estos sistemas, el impacto del agua que precipita es menor gracias a la reducción de su intensidad por la traslocación del agua a través del dosel y su consecuente escurrimiento a través del fuste (escurrimiento fustal), reduciendo el impacto directo de la precipitación sobre el suelo y favoreciendo la infiltración del agua, permitiendo así que el volumen de agua precipitado escurra de manera hipodérmica.

El escurrimiento total de la microcuenca bajo los escenarios RCP2.6 y RCP8.5, reflejan un incremento con respecto al escurrimiento histórico, de 97.39 % y 107.22 % respectivamente. Siendo la subunidad 4, la que presenta el mayor incremento en términos de milímetros escurridos 110.44 % y 123.02 %, para el RCP2.6 y RCP8.5 respectivamente. Sin embargo, la subunidad 4 con respecto al resto de subunidades, presenta los valores más bajos de escurrimiento en ambos escenarios gracias al uso actual que presenta.

De acuerdo con los datos de escurrimientos futuros, la subunidad 6 también presentará un aumento en el escurrimiento superficial, destacando que en esta se presenta desembocadura del río El Espinal, aumentando hasta 400 mm en los RCP 2.6 y RCP 8.5 con referencia a lo modelado con los datos históricos. Lo que para las obras con los códigos 3199, 418 y 1532 representarían, cierto beneficio en lo que refiere a su mantenimiento.

Para el caso específico de la obra 1579, ubicada en la subunidad número 4, presentará un leve aumento en cuanto a la escorrentía superficial, pero ligado a su uso de pasto, con suelos Alfisol y que esta se encuentra en una pendiente de 35 % lo cual podría desfavorecer a la sostenibilidad de la obra.

Destaca el aporte de las URH con agricultura (Figura 36), suelos de alto contenido de arcilla expansible en su horizonte superficial (Vertic Haplustalfs) en pendientes mayores a 15-30 %, en la obra de cosecha de agua código 347 con 519.19 mm para el RCP 2.6 y 601.38 mm para el RCP 8.5 y la obra de cosecha de agua código 482 con 591. 19 mm para el RCP 2.6

y 601.38 mm para el RCP 8.5 establecidas en la subunidad 5, siendo las que generarían los mayores escurrimientos.

El comportamiento futuro del escurrimiento podría ser beneficioso para algunas obras de cosecha de agua por escorrentía si el área de captación o área de siembra de agua de la obra está protegida con cobertura vegetal permanente. En caso contrario representaría un riesgo, puesto que el incremento de las precipitaciones previsto bajo los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, con eventos de precipitaciones erráticas, podrían comprometer la infraestructura de las obras si no se le brinda un mantenimiento periódico.

El análisis a nivel de unidades hidrográficas se realiza con el fin de evidenciar de qué manera la combinación de las coberturas, pendientes y tipos de suelos influyen en la generación de sedimentos, además que a su vez los aportes de cada una de estas influyen en el escurrimiento total a nivel de subunidades.

Según Velázquez y Acuña (2015), la microcuenca del río El Espinal presenta una alta vulnerabilidad ecológica. Ligado al nivel de pobreza que se presenta en la microcuenca, lo que ocasiona el uso inadecuado de los recursos naturales. Además, presenta un riesgo por inundaciones en la parte baja de la microcuenca, que también supondría riesgos para la conservación de las obras.

VI. CONCLUSIONES

La microcuenca del río El Espinal, se caracteriza por presentar una morfometría que beneficia el escurrimiento superficial; presenta un clima cálido y seco, con vegetación arbustiva con bosque seco subtropical, suelos escarpados en su mayoría Alfisoles (45.44 %) y Entisoles (25.33 %) característicos por su textura arcillosa, que favorece las inundaciones en la parte baja de la microcuenca debido al drenaje superficial excesivo y un mayor porcentaje de escorrentía en tiempos prolongados de precipitaciones.

Los escenarios climáticos reflejan un aumento en las precipitaciones en comparación a los datos del registro histórico, al igual que el aumento de los caudales reflejando un comportamiento similar en ambos escenarios en los primeros años proyectados, diferenciando un aumento significativo en el RCP 8.5 a partir del año 2051 lo que puede tener un impacto en la recarga de las obras de cosecha de agua debido a la distribución irregular de las precipitaciones ocasionando daños en la infraestructura de las mismas.

De acuerdo con las URH para los escenarios climáticos RCP 2.6 y RCP 8.5 habrá un aumento del escurrimiento superficial en comparación a los datos históricos siendo mayor para el RCP 8.5, destacando la subunidad 5 que genera el mayor aporte en suelos Vertic Haplustalfs con agricultura en pendientes mayores a 15-30 %, seguida por la subunidad 6 donde se encuentra el punto de desemboque.

De manera general se espera que las obras de cosecha de aguas ya establecidas en la microcuenca del río el espinal, sean sostenible al paso de los años, de acuerdo con las estimaciones de las precipitaciones, en su aumento para ambos escenarios climáticos RCP 2.6 y RCP 8.5 con aumentos en su media de hasta casi 200 mm con referencia al histórico y de hasta casi 190 mm de escurrimiento superficial por media anual, siendo posible en el caso que las precipitaciones se distribuyan de manera regular en los meses lluviosos, de lo contrario podría ponerse en riesgo su estabilidad y funcionalidad.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda dar mantenimiento a las Obras de Cosecha de Agua, establecer un perímetro apropiado de vegetación arbustiva o arbórea para mantener un microclima idóneo para las obras para brindarle protección y evitar la pérdida excesiva por evaporación así mismo para garantizar la estabilidad y funcionamiento de las mismas.

Mejorar el sistema de desagüe de las obras de cosechas de agua, para evitar riesgos y daños a la infraestructura de las mismas debido al aumento de las precipitaciones que pueden presentarse en un futuro.

Brindar asistencia técnica a los comunitarios involucrados en el proyecto, así como educación ambiental sobre temáticas de Cambio Climático para fortalecer sus capacidades de adaptación y resiliencia ante esta problemática.

VIII. LITERATURA CITADA

- Blandón, L. C. (23 de marzo de 2018). *Influencia del uso de suelo en la dinámica hidrológica de las aguas superficiales en la Microcuenca río Pire, Municipio de Condega, Departamento de Estelí*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua]. <https://repositorio.unan.edu.ni/10879/1/0707.pdf>
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. (20 de abril de 2010). *Conceptos básicos y guía*. <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- CEPAL. (agosto de 2010). *Nicaragua efectos del cambio climático sobre la agricultura*. <https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/25925/1/lcmex1964.pdf>
- CEPAL & PNUD (10 de septiembre de 2008). *Impacto del huracán Félix en la región autónoma del atlántico norte y de las lluvias torrenciales en el noreste de Nicaragua*. [Archivo PDF]. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/25868/LCmexL860rev1_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial*. <http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist.%20Cart.%20y%20Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
- CIAT. (20 de abril de 2010). *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario, Versión SWAT2005* [Archivo PDF]. <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Espinoza, M. (2017). *Impacto del Cambio Climático en el comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas, aplicando el modelo SWAT en Nicaragua*. [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua]. <https://repositorio.una.edu.ni/3587/1/tnp40e77i.pdf>
- FAO. (1984). *Land evaluation for forestry*. <https://www.fao.org/3/t0036e/t0036e.pdf>
- FAO. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal El significado de la porosidad del suelo*. <https://www.fao.org/3/y4690s/y4690s00.htm#Contents>
- Fernandez, R. (18 de abril de 2017). *Utilización del programa "swat" para la estimación de la emisión de sedimentos en cuencas*. http://www5.uva.es/trim/TRIM/TRIM12_files/RFernandez.pdf
- Gamez, W. (2010). *Texto básico de Hidrología*. <https://repositorio.una.edu.ni/2464/1/np10g192.pdf>
- Hudson, N. W. (1997). *Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía* (Vol. 68). Organización de Alimentos y Agricultura. https://books.google.com.ni/books?hl=es&lr=&id=m1DFcx3B0dYC&oi=fnd&pg=PR1&dq=Hudson+1997+caudales&ots=7VnQGKaIol&sig=a_WNWSMQ6i_YsK2KK-1oANjd1JY#v=onepage&q=Hudson%201997%20caudales&f=false

- INETER. (18 de noviembre de 2021). *Perspectiva del probable comportamiento de las lluvias durante el periodo diciembre 2021, enero, febrero y marzo 2022 (Apante)*. [Archivo PDF]. https://www.ineter.gob.ni/boletines/Boletin%20Perspectiva%20periodo%20lluvioso/PERSPECTIVAS-LLUVIAS-DEFM_2021-2022-2.pdf
- IPCC. (5 de noviembre de 2014). *Cambio climático 2014, Informe de síntesis*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- IPCC. (09 de agosto de 2021). *Sexto informe de evaluación del IPCC*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/technical-summary/>
- Llanes, M., & Rizo, D. (abril de 2019). *Evaluación del efecto de cuatro sistemas de uso del suelo sobre propiedades hidrofísicas, en la microcuenca Quebrada Arriba, Yalagüina, 2017*. <https://repositorio.una.edu.ni/3853/1/tnp3311791.pdf>
- Lopez, K. (abril de 2008). *Evaluación de la calidad del establecimiento y efecto de las prácticas de conservación de suelo y agua sobre la calidad del suelo en laderas de Nicaragua* [Tesis de graduación, Universidad Nacional Agraria]. <https://repositorio.una.edu.ni/1109/1/tnp361864.pdf>
- Martinez, J. (16 de noviembre de 2020). Estos son los huracanes que han afectado a Nicaragua en la historia. *La nueva radio Ya*. <https://nuevaya.com.ni/estos-son-los-huracanes-que-han-afectado-a-nicaragua-en-la-historia/>
- Mendoza, C. (2014). Guía para el uso de indicadores de calidad de suelo. [Archivo PDF]. <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/REN35M539.pdf>.
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (9 de noviembre de 2018). *Último informe del IPCC emite una alerta al mundo sobre el cambio climático*. <https://www.ambiente.gob.ec/ultimo-informe-del-ipcc-emite-una-alerta-al-mundo-sobre-el-cambio-climatico/>
- NOAA. (s.f.). *Datos de los indicadores oceanicos*. <https://www.aoml.noaa.gov/phod/indexes/index.php>
- Observatorio de Salud y Cambio Climático. (2013). *Nuevos escenarios de emisión RCPs*. http://www.oscc.gob.es/es/general/salud_cambio_climatico/Nuevos_escenarios_emision_RCPs.htm
- OCHA. (22 de febrero de 2021). *Nicaragua: Plan de acción 2020 - Huracanes Eta e Iota, enero 2021 (One Pager)*. [https://reliefweb.int/report/nicaragua/nicaragua-2020-plan-de-accion-huracanes-eta-e-iota-enero-2021-one-pager#:~:text=Los%20huracanes%20Eta%20e%20Iota,Costa%20Caribe%20Norte%20\(RACCN\)](https://reliefweb.int/report/nicaragua/nicaragua-2020-plan-de-accion-huracanes-eta-e-iota-enero-2021-one-pager#:~:text=Los%20huracanes%20Eta%20e%20Iota,Costa%20Caribe%20Norte%20(RACCN))
- Pérez, J., Valdés, E., Hernández, R., & Ordaz, V. (2005). Lluvia, Escurrimiento Superficial y Erosión del Suelo en Sistemas Agroforestales de café bajo sombra. *Agrociencia*, 39 (4), 409-418. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30239405.pdf>

- Pelegrí, J. (11 de agosto de 2021). *Informe IPCC: Certezas e incertidumbres sobre el cambio climático*. <https://theconversation.com/informe-ipcc-certezas-e-incertidumbres-sobre-el-cambio-climatico-165996>
- Ruiz, V., Savé, R., Lanuza, O., Herrera, A., López, K., & Urrutia, J. (abril de 2021). *Evolución de la temperatura y precipitación en cuatro estaciones meteorológicas, ubicadas en la región Norcentral de Nicaragua, Centroamérica*. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, (38) <https://doi.org/10.5377/farem.v0i38.11952>
- Salgado, M. (3 de febrero 2012) *Aplicación de un sistema multimétrico para evaluar la calidad del agua superficial en la microcuenca El Coyote del Río Estelí, Nicaragua*. [Tesis de graduación, Universidad Nacional Agraria]. <https://repositorio.una.edu.ni/1172/1/tnp10s164.pdf>
- Sánchez, J; & Suazo, R. (2020) *Reconocimiento de las causas del escurrimiento superficial en la finca el plantel, Tipitapa– Masaya, Periodo 2018*, [Tesis de graduación, Universidad Nacional Agraria]. <https://repositorio.una.edu.ni/4157/1/tnp11s194.pdf>
- TROCAIRE (abril de 2011). *Plan de ordenamiento territorial microcuenca El Espinal, Pueblo Nuevo-Estelí*. <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/RENp10A284m.pdf>
- Tutoriales al día Ingeniería Civil. (2014). *Algunos parámetros de forma y drenaje de la cuenca hidrográfica y su relación con el tiempo de concentración*. <https://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/algunos-parametros-de-forma-y-drenaje-de-la-cuenca-hidrografica-y-su-relacion-con-el-tiempo-de-concentracion/>
- UNA & CRS (agosto de 2017). *Guía técnica para muestreo de suelos* [Archivo PDF]. <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- USDA. (agosto de 1999). *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. <http://agroecologiar.com/wp-content/uploads/2019/08/Guia-eval-calidad-y-salud-del-suelo.pdf>
- USDA. (13 de abril de 2017). *Guía de campo para el muestreo y descripción de los perfiles de suelos*. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/field-book-spanish.pdf>
- Velázquez, J., & Acuña, E. (2015). Análisis de amenazas a deslizamiento de tierra e inundación y su influencia socio ambiental en la gestión de riesgo en la microcuenca El Espinal, Pueblo Nuevo, Estelí. *LA CALERA*, 15 (25), 90-99. <https://lascalera.una.edu.ni/index.php/CALERA/article/view/265/261>
- Yáñez Gutiérrez, F., Hermoza Espezuía, R. M., & Bazán Tapia, L. R. (12 de diciembre de 2017). *Caracterización de la infiltración de agua en tres sistemas de uso del suelo de la Comunidad Santiago de Carampoma, Huarochirí, Lima*. <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v78i2.1056>

IX. ANEXOS

Anexo 1. Balance hídrico del registro histórico 2000-2021 microcuenca del río El Espinal

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	CRAD
P	2.03	1.29	11.71	31.45	193.53	209.71	79.29	107.81	205.09	234.62	46.50	11.20	96.15
ETP	86.73	96.32	120.65	148.26	147.50	106.86	114.57	123.12	108.17	96.70	86.13	85.06	
P-ETP	-84.70	-95.03	-108.94	-116.81	46.03	102.85	-35.28	-15.31	96.92	137.92	-39.63	-73.86	
PPA	-198.19	-293.21	-402.16	-518.97	0.00	0.00	-35.28	-50.59	0.00	0.00	-39.63	-113.49	
RES	12.24	4.56	1.47	0.44	96.15	96.15	66.62	56.81	96.15	96.15	63.67	29.54	
VR	-17.30	-7.68	-3.09	-1.03	95.71	0.00	-29.53	-9.81	39.34	0.00	-32.48	-34.14	
ETR	19.33	8.98	14.79	32.48	147.50	106.86	108.83	117.61	108.17	96.70	78.98	45.34	
DEF	67.40	87.34	105.85	115.78	0.00	0.00	5.75	5.50	0.00	0.00	7.15	39.72	
EXC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	102.85	0.00	0.00	57.58	137.92	0.00	0.00	
DRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	51.42	0.00	0.00	28.79	83.35	0.00	0.00	

Anexo 2. Balance hídrico RCP 2.6 periodo 2043 – 2069 microcuenca del río El Espinal

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	CRAD
P	6.80	4.22	2.95	8.66	307.80	271.02	131.18	191.28	92.97	339.02	4.75	11.23	96.15
ETP	89.57	79.75	108.45	116.97	163.89	151.51	133.17	134.51	117.27	123.21	101.95	70.35	
P-ETP	-82.76	-75.52	-105.50	-108.31	143.91	119.51	-2.00	56.77	-24.30	215.81	-97.19	-59.12	
PPA	-239.08	-314.60	-420.10	-528.41	0.00	0.00	-2.00	0.00	-24.30	0.00	-97.19	-156.31	
RES	8.00	3.65	1.22	0.39	96.15	96.15	94.17	96.15	74.68	96.15	34.99	18.92	
VR	-10.92	-4.35	-2.43	-0.82	95.76	0.00	-1.98	1.98	-21.47	21.47	-61.16	-16.07	
ETR	17.72	8.58	5.38	9.49	163.89	151.51	133.15	134.51	114.44	123.21	65.91	27.30	
DEF	71.84	71.17	103.07	107.49	0.00	0.00	0.02	0.00	2.83	0.00	36.03	43.05	
EXC	0.00	0.00	0.00	0.00	48.16	119.51	0.00	54.79	0.00	194.34	0.00	0.00	
DRE	0.00	0.00	0.00	0.00	24.08	71.79	0.00	27.39	0.00	97.17	0.00	0.00	

Anexo 3. Balance hídrico RCP 8.5 periodo 2043 – 2069 microcuenca del río El Espinal

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	CRAD
P	0.00	1.18	6.03	24.54	263.59	289.91	77.20	163.96	131.35	401.87	1.64	24.32	96.15
ETP	96.27	90.78	120.38	130.82	188.58	173.27	150.86	156.79	129.51	139.47	112.34	80.53	
P-ETP	-96.27	-89.60	-114.35	-106.27	75.01	116.64	-73.66	7.17	1.85	262.40	-110.70	-56.21	
PPA	-263.18	-352.78	-467.13	-573.41	0.00	0.00	-73.66	0.00	0.00	0.00	-110.70	-166.91	
RES	6.23	2.45	0.75	0.25	96.15	96.15	44.69	96.15	96.15	96.15	30.40	16.94	
VR	-10.72	-3.77	-1.71	-0.50	95.90	0.00	-51.46	51.46	0.00	0.00	-65.75	-13.46	
ETR	10.72	4.96	7.74	25.04	188.58	173.27	128.66	156.79	129.51	139.47	67.38	37.78	
DEF	85.55	85.83	112.65	105.77	0.00	0.00	22.20	0.00	0.00	0.00	44.96	42.75	
EXC	0.00	0.00	0.00	0.00	-20.89	116.64	0.00	-44.28	1.85	262.40	0.00	0.00	
DRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	58.32	0.00	0.00	0.92	131.66	0.00	0.00	

Anexo 4. Consolidado de pruebas de infiltración microcuenca del río El Espinal

ID	X	Y	Elevación	Cobertura	Inf mm/h	Orden
ELEP1	544730	1477815	975	Café con sombra	53.64	Vertisol
ELEP2	545389	1477330	941	Cultivo de sorgo(millón)	50.77	Alfisol
ELEP3	545653	1477378	921	Bosque ripario	43.05	Alfisol
ELEP4	546311	1477535	909	Pasto	49.58	Alfisol
ELEP5	546714	1477183	822	Pasto	77.94	Alfisol
ELEP6	546989	1477183	770	Bosque ripario	36.25	Alfisol
ELEP7	547859	1477132	755	Bosque secundario	33.78	Alfisol
ELEP8	549082	1477366	693	Bosque ripario	47.66	Molisol
ELEP9	547723	1479563	807	Cultivo anual (rastroy de maíz)	20.03	Molisol
ELEP10	548089	1478748	759	Cultivo anual(sorgo)	70.88	Alfisol
ELEP11	531190	1477253	675	Café con sombra	32.33	Vertisol
ELEP12	547664	1478778	748	Pasto	26.02	Alfisol
ELEP13	547664	1478778	748	café con sombra	98.96	Molisol
ELEP14	547664	1478778	748	Pasto	54.66	Vertisol