



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente

Ingeniería en Recursos Naturales

*Proyecciones del escurrimiento superficial bajo diferentes
escenarios climáticos en la microcuenca del río El Varillal, San
Lucas, Madriz*

Autores:

Br. Cledys Lisseth Zelaya Lanzas

Br. Orlando Ismael Rodríguez Rodríguez

Asesores:

Ing. Mariann José Espinoza Acuña

MSc. Raquel Dolores Izabá Ruíz

Ing. Claudio Joel González Espino

Noviembre, 2022

Managua, Nicaragua



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente

Ingeniería en Recursos Naturales

*Proyecciones del escurrimiento superficial bajo diferentes
escenarios climáticos en la microcuenca del río El Varillal, San
Lucas, Madriz*

Autores:

Br. Cledys Lisseth Zelaya Lanzas

Br. Orlando Ismael Rodríguez Rodríguez

Asesores:

Ing. Mariann José Espinoza Acuña

MSc. Raquel Dolores Izabá Ruíz

Ing. Claudio Joel 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.

Noviembre, 2022


Managua, Nicaragua

Hoja de aprobación del comité evaluador


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:



PhD. Efraín Lucrecio Acuña Espinal
Presidente



MSc. Harvin Joel Bonilla Escoto
Secretario



Mp. Mario César Gutiérrez Alarcón
Vocal

Noviembre, 2022

Managua, Nicaragua

DEDICATORIA

Dedico este trabajo:

A Dios, por guiarme, acompañarme, ser luz en mi camino y darme sabiduría para alcanzar mis objetivos.

A mis padres, Martín Zelaya y Esmilda Lanzas, por su apoyo incondicional en mi formación profesional, guiarme por el buen camino, educarme con buenos valores y hacer este sueño posible.

A mis hermanos por apoyarme; y darme ánimos durante la carrera. A mis abuelas Carmen Lanzas y Petrona Andino por su apoyo, a mis tías que son las personas que más admiro. Al resto de familia por su apoyo.

A mis familiares más cercanos: Sara Pérez, Isadora Zelaya, Meyling Ruiz, Gloria Galán y Janet Zelaya, por su apoyo, sin ustedes este sueño no fuese posibles, gracias por acogerme.

A mis amigos: Jennifers Castro, Dayana Moreno, Katerin Herrera, Alisson Urbina, Sleydy López, Mariann Espinoza y Sarahi González, que formaron parte indispensable en mi vida, motivándome y apoyándome cada día.

Cledys Lisseth Zelaya Lanzas

DEDICATORIA

Este trabajo final lo quiero dedicar de manera especial a:

Dios por permitirme la vida en estos 5 años de carrera, por la sabiduría y entendimiento para lograr finalizar esta investigación.

A mis padres, María Isabel Rodríguez y Donald de Jesús Rodríguez Alberto, por su apoyo y deseo de superación, por el cariño y la dedicación que han brindado con mucho esfuerzo y sacrificio.

A mis hermanos, porque siempre me han brindado su apoyo y alimentado el deseo de seguir hacia adelante.

Orlando Ismael Rodríguez Rodríguez

AGRADECIMIENTO

De manera especial queremos agradecer a:

Al proyecto “Cosecha de Agua” del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) por el financiamiento de esta investigación.

A nuestros asesores, Ing. Mariann José Espinoza Acuña, por su paciencia, apoyo incondicional durante la planificación, análisis de resultados y su disposición para atendernos. A la MSc. Raquel Izaba Ruiz y el Ing. Claudio González por su apoyo y atención durante el proceso de esta tesis.

Aquellos profesores que nos ayudaron a crecer profesional y personal durante nuestra carrera. En especial, al profesor Ernesto Tünnermann Gutiérrez (QDEP).

A nuestros compañeros, Sarahi González, Miguel Reyes, Osmin Molina, Roberto Mercado y Eyner Bustos, por su apoyo durante la recolección de datos de esta tesis.

Cledys Lisseth Zelaya Lanzas
Orlando Ismael Rodríguez Rodríguez

ÍNDICE DE CONTENIDO

SECCIÓN	PÁGINA
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivo Específicos.....	3
III. MARCO DE REFERENCIA.....	4
3.1. Modelos climáticos.....	4
3.2. Herramienta de Evaluación de Suelos y Agua.....	4
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
4.1. Ubicación del área de estudio.....	7
4.2. Características biofísicas.....	7
4.3. Diseño metodológico.....	9
4.3.1. Recopilación de datos.....	9
4.3.2. Procesamiento de datos en SWAT.....	18
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
5.1. Caracterización biofísica de la microcuenca.....	21
5.1.1. Morfometría.....	21
5.1.2. Recurso Edáfico.....	24
5.1.3. Uso actual del suelo.....	32
5.1.4. Relación de la velocidad de infiltración con el uso y orden del suelo.....	36
5.1.5. Balance hídrico.....	37
5.2. Comportamiento de los caudales.....	41
5.2.1. Escenario histórico y actuales.....	41

5.2.2. Escenario futuro	44
5.3. Influencia de las unidades de respuesta hidrológicas sobre el escurrimiento superficial	45
VI. CONCLUSIONES.....	51
VII. RECOMENDACIONES	52
VIII. LITERATURA CITADA.....	53
IX. ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE CUADRO

CUADRO	PÁGINA
1. Dataset de Climate Engine utilizados para la modelación hidrológica.	10
2. Índice de compacidad o coeficiente de Gravelius	13
3. clases y tasas de infiltración y su relación con el potencial de erosión de suelo	16
4. Puntos de monitoreo de caudales de la microcuenca del río EL Varillal	17
5. Formato del archivo de entrada de datos al modelo SWAT	18
6. Clasificación de coberturas según SWAT	18
7. Parámetros de suelos requeridos por la herramienta SAWT para cada tipo de suelo	19
8. Características morfométricas de la microcuenca del río El Varillal	21
9. Subgrupos taxonómicos presentes en la microcuenca del río El Varillal	24
10. Descripción del perfil del subgrupo Typic Haplusterts en la comunidad La Playa, San Lucas, Madriz	27
11. Descripción del perfil del subgrupo Typic Haplusterts en la comunidad de Mal Paso, San Lucas, Madriz	28
12. Descripción del perfil del subgrupo Lithic Usthorments en la comunidad La Playa, San Lucas, Madriz	30
13. Descripción del perfil del subgrupo Lithic Ustorthents en la comunidad Mal Paso, San Lucas, Madriz	31
14. Descripción del perfil del subgrupo Vertic Ustorthents en la comunidad Mal Paso, San Lucas, Madriz	32
15. Distribución de los usos del suelo en la microcuenca del río El Varillal.	33
16. Pruebas de infiltración por uso y subgrupo de suelo	36
17. Caudales medidos en la microcuenca del río El Varillal.	43
18. Escurrimiento superficial en milímetros por subunidad, de la microcuenca del río El Varillal	45
19. Aporte de las subunidades de respuesta hidrológicas en las obras de cosecha de agua establecidas en la microcuenca del río El Varillal	48

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1. Ubicación geográfica de la microcuenca del río El Varillal	8
2. Flujograma del modelo hidrológico SWAT.	10
3. Trayectorias de concentración representativas (RCP).	12
4. Curva hipsométrica de la microcuenca del río El Varillal.	22
5. Distribución porcentual de los subgrupos taxonómicos presentes en la microcuenca El Varillal	24
6. Subgrupos taxonómicos de suelos presentes en la microcuenca del río El Varillal.	25
7. Paisaje representativo del suelo Typic Haplusterts, comunidad La Playa.	26
8. Perfil de suelo typic Haplusterts, comunidad La Playa.	26
9. Cosecha de agua establecido en un suelo Typic Haplusterts, comunidad Mal Paso, cerro Misalguato.	27
10. Perfil de suelo Typic Haplusterts, comunidad Mal Paso, cerro Misalguato.	27
11. Paisaje representativo del suelo Lithic Ustorthents, en la comunidad La Playa	29
12. Perfil de suelo Lithic Ustorthents, comunidad La Playa.	29
13. Paisaje representativo del suelo Lithic Ustorthents, en la comunidad Mal Paso.	30
14. Perfil de suelo Lithic Ustorthents, comunidad Mal Paso.	30
15. Paisaje representativo del suelo Vertic Ustorthents, en la comunidad Mal Paso.	31
16. Perfil de suelo Vertic Ustorthents, en la comunidad Mal Paso.	31
17. Distribución actual de usos de suelo en la microcuenca del río El Varillal	32
18. Fotografía representativa del uso Pastizal	33
19. Fotografía representativa del uso Vegetación arbustiva	33
20. Fotografía representativa del uso Bosque latifoliado	34
21. Fotografía representativa del uso Cultivo anual	34
22. Usos del suelo en la microcuenca del río El Varillal, San Lucas, Matriz.	35
23. Balance hídrico de la microcuenca el Varillal, periodo 2000-2021.	38
24. Balance hídrico de la microcuenca el Varillal bajo el escenario (RCP2.6)	38
25. Balance hídrico de la microcuenca el Varillal bajo el escenario (RCP8.5)	39
26. Comparación de escenarios climáticos	40

27. Hidrograma Anual 2003-2021 El Varillal.	42
28. Hidrograma 2021 de la microcuenca del río El Varillal.	43
29. Hidrograma del periodo 2043- 2069 de la microcuenca del río El Varillal, bajo los escenarios climáticos RCP 2.6 Y 8.5	44
30. Unidades de Respuesta hidrológica presentes en la microcuenca del río El Varillal	46
31. Comportamiento del escurrimiento superficial en la microcuenca del río El Varillal	49

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
1. Balances hídrico de la microcuenca del río El Varillal (escenario histórico)	57
2. Balance hídrico de la microcuenca del río El Varillal (escenario RCP 2.6)	57
3. Balance hídrico de la microcuenca del río El Varillal (escenario RCP 8.5)	58
4. Hoja de texto para precipitación en SWAT	59
5. Hoja de texto para radiación solar en SWAT	59
6. Hoja de texto para temperatura máxima y mínima solar en SWAT	59
7. Hoja de texto para velocidad del viento en SWAT	59
8. Base de datos para suelo en SWAT	60

RESUMEN

Nicaragua presenta una alta vulnerabilidad al Cambio Climático, lo que se ha evidenciado en los impactos de recientes eventos climáticos. Este estudio tiene como finalidad realizar un análisis del comportamiento de escorrentía superficial bajo diferentes escenarios climáticos para la valoración del potencial de obras de cosecha de agua por escorrentía en la microcuenca del río El Varillal, en San Lucas, Madriz. El modelo hidrológico utilizado es la Herramienta de Evaluación de Suelos y Agua (por sus siglas en inglés, SWAT) el cual requiere información sobre suelos, usos de la tierra y variables climáticas. La información de suelo fue recolectada mediante muestreo por toposecuencia utilizando la “Guía técnica para muestreo de suelos” descrita por UNA&CRS (2017), Clave para la Taxonomía de suelo del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 2014). Se identificaron los diferentes usos actuales del suelo a partir del método de clasificación supervisada, utilizando la metodología del programa REDD/CCAD-GIZ 2014; para la recolección de las variables climáticas de los datos históricos y futuros en un periodo de (2049-2069). Se utilizó CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), CFS Reanalysis (Climate Forecast System) y MarkSim. La microcuenca cuenta con un área de 16.39 Km², y está conformada por dos órdenes de suelo: vertisol con 32.4% y entisol con 67.6 % con texturas dominantes franco arcilloso y arcillosa; Así mismo, el suelo en su mayoría está ocupado por pastizales, seguido de pequeños bosques latifoliados. Al comparar los datos del balance hídrico: histórico y los escenarios futuros RCP2.6 y RCP8.5, se logra apreciar el aumento de las precipitaciones en 53.22 mm y el desplazamiento del periodo canicular entre los meses agosto y septiembre, en los escenarios futuros. Se identificaron 137 unidades de repuesta hidrológicas, las cuales están en pendientes inclinadas a escarpadas, con usos de agricultura y pastizal con predominancias en suelos entisoles. Se concluye que el comportamiento futuro del escurrimiento superficial aumentará un 101.56% y 109.48% en los escenarios futuros RCP2.6 y RCP8.5.

Palabras claves: uso de suelo, escorrentía superficial, balance hídrico, unidades de repuesta hidrológica.

ABSTRACT.

Nicaragua presents a high vulnerability to Climate Change, which has been evidenced in the impacts of recent climatic events. The purpose of this study is to carry out an analysis of the behavior of surface runoff under different climatic scenarios to assess the potential of water harvesting works by runoff in the micro-watershed of the El Varillal river, in San Lucas, Madriz. The hydrological model used is the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) which requires information on soils, land uses and climatic variables. Soil information was collected by topo sequence sampling using the "Technical Guide for Soil Sampling" described by UNA&CRS (2017), Key to Soil Taxonomy of the United States Department of Agriculture (USDA, 2014). The different current land uses were identified from the supervised classification method, using the methodology of the REDD/CCAD-GIZ 2014 program; For the collection of the climatic variables of the historical and future data in a period of (2049-2069). CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), CFS Reanalysis (Climate Forecast System) and MarkSim were used. The micro-watershed has an area of 16.39 km² and is made up of two soil orders: vertisol with 32.4% and entisol with 67.6% with dominant clayey and clayey textures; Likewise, the soil is mostly occupied by grasslands, followed by small broadleaf forests. When comparing the water balance data: historical and the future scenarios RCP2.6 and RCP8.5, it is possible to appreciate the increase in rainfall by 53.22 mm and the displacement of the canicular period between the months of August and September, in the future scenarios. 137 hydrological response units were identified, which are on steep to steep slopes, with uses for agriculture and pasture with predominance of entisol soils. It is concluded that the future behavior of surface runoff will increase by 101.56% and 109.48% in the future scenarios RCP2.6 and RCP8.5.

Keywords: land use, surface runoff, water balance, hydrological response units.

I. INTRODUCCIÓN

Acorde al V Informe sobre Cambio Climático y la tierra del Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], (2015), 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 la duración de muchos eventos extremos, incluidas las olas de calor y eventos de precipitación intensos.

A largo plazo las precipitaciones se verán afectada a consecuencia del cambio climático, aunque en la próxima década Nicaragua no presenta importantes variaciones, a futuro casi todos los modelos climáticos utilizados proyectan que el cambio climático tendrá implicaciones en la reducción de lluvia, que se prevé que van a disminuir hasta en un 0.25% anual. (Ribalaygua *et al.*, 2011).

En Nicaragua, la agricultura y ganadería de pequeña escala en la subcuenca del río Coco Somoto, específicamente en los municipios de Somoto y San Lucas, constituyen uno de los principales medios de vida de las familias, pero que se ve amenazada por condiciones climáticas extremas como sequías y en ciertas ocasiones, por excesos de lluvia, año tras año. (Gourdjia *et al.*, 2015)

Nicaragua es uno de los países con alta vulnerabilidad al cambio climático, lo que se ha evidenciado en los impactos recientes de eventos climáticos, siendo el recurso agua el más afectado debido a los aumentos observados y proyectados en temperatura, evaporación y variabilidad en las precipitaciones (IPCC, 2007).

“Parte del territorio de los departamentos de Madriz, Nueva Segovia, municipios del norte de León, Estelí, Chinandega y oeste de Matagalpa conforman el denominado Corredor Seco de Nicaragua” (Blandón, 2018), los cuales presentan la mayor vulnerabilidad ante el Cambio Climático.

Bajo este contexto, surge el proyecto “Cosecha de Agua” del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE). Este benefició a pequeños productores del corredor seco con obras de cosechas de aguas por escorrentías, manantiales o techo, para contribuir a la resiliencia ante el Cambio Climático.

A raíz de esto, surge la necesidad de realizar un análisis del comportamiento de la escorrentía superficial para determinar el potencial de las obras de cosechas de agua establecidas bajo distintos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello, con el proyecto “Adaptación de la Agricultura del Cambio Climático a través de la cosecha de agua en Nicaragua” ejecutado por la Universidad Nacional Agraria, se realizó este análisis en la microcuenca del río El Varillal ubicada en el departamento de Madriz, mediante el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

El monitoreo de las variables climáticas en el tiempo es el punto de partida para el estudio del comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas a través de modelos hidrológicos como lo es Soil and Water Assessment Tool (SWAT), los cuales brindan las pautas para la formulación de estrategias de adaptación al cambio climático, en pro a alcanzar la sostenibilidad económica, ambiental y social (Espinoza, 2017).

Este estudio generará información relevante sobre el comportamiento de la escorrentía, que permitirá a los actores locales tomar decisiones en función de la planificación y la implementación de acciones a nivel de manejo de recursos naturales, del manejo de sistema de cosecha de agua y la gestión integrada de los recursos hídricos de la zona.

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 esorrentía en la microcuenca del río El Varillal, San Lucas, Matriz.

2.2.Objetivo 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

3.1. Modelos climáticos

Según el IPCC (2013):

El sistema climático se puede representar mediante modelos de diverso grado de complejidad; en otras palabras, para cada componente o conjunto de componentes es posible identificar un espectro o jerarquía de modelos que difieren en aspectos tales como el número de dimensiones espaciales, el grado en que aparecen representados explícitamente los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas.

El IPCC (2013) afirma que:

Los modelos de circulación general atmósfera-océano (MCGAO) acoplados proporcionan la más completa representación del sistema climático actualmente disponible. Se está evolucionando hacia modelos más complejos que incorporan química y biología interactiva. Los modelos climáticos se utilizan como herramienta de investigación para estudiar y simular el clima y para fines operativos, en particular predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales.

3.2. Herramienta de Evaluación de Suelos y Agua

La Herramienta de Evaluación de Suelos y Agua (por sus siglas en inglés, SWAT), es el modelo a escala desarrollado por el Dr. Jeff Arnold conjuntamente por el servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA-ARS) y Texas A&M AgriLife Research.

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.

Fernandez (2017) expresa que:

Los modelos de simulación hidrológica destacan SWAT (Soil and Water Assessment Tool), (...) permite conocer la dinámica hídrica de las cuencas bajo diversos escenarios actuales y futuros, permitiendo una visión holística de la cuenca. 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.

En la tesis de investigación, “*Comportamiento de la erosión y sedimentos por escorrentía superficial sobre las obras de cosecha de agua tipo reservorio, en la subcuenca Río Coco- Somoto, corredor seco de Nicaragua-Centroamérica*” de Arriaga (2021), mencionan que la subcuenca presenta una precipitación anual en el periodo (1990-2020) de 1047.9 mm, evapotranspiración real de 155.7 mm, y la escorrentía superficial de 198.6 mm, que representa el 18.9 % de la precipitación ocurrida.

Arriaga (2021) identificó tres unidades hidrográficas con mayores cantidades de producción de escorrentía superficial con promedios anuales de 150 a 292 mm año⁻¹, en donde una de ellas corresponde a la microcuenca del río El Varillal. El escurrimiento superficial está asociada al tipo de suelo presente en la subcuenca, la cobertura dominante del suelo es arbustiva con presencia de pasturas y cultivos permanentes, un escurrimiento de 342.56 mm.

Romero (2020), en su investigación “*Estimación del potencial hídrico en las microcuencas Jalapa, La Tablazón, Inalí y Guayucalí ubicadas en la Segovia, (2018-2019)*”, indica que la microcuenca Inalí, próxima a la microcuenca El Varillal, presenta morfometría que la convierte susceptible a mayor volumen y velocidad de los escurrimientos superficiales ante un evento hidrometeorológico, originando mayores picos de caudales agua abajo en sus puntos salidas, siendo una microcuenca de acción erosiva moderada.

Romero (2020) estimó que la microcuenca presenta una Capacidad de Retención de Agua Disponible (CRAD) de 24 mm y un déficit de 318.4 mm año⁻¹, mientras la precipitación se hace igual a la ETR, en los meses de febrero hasta abril, pero ambas variables no llegan a valores de cero ya que siempre hay agua de las reservas en el suelo evaporándose y mínimos aportes por lluvias orográficas muy localizadas.

En la investigación “*Impacto del cambio climático en el comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas, aplicado el modelo SWAT en Nicaragua*”, Espinoza (2017) identificó que las unidades hidrográficas con mayor déficit hídrico se encuentran dentro del corredor seco, entre ellas la 95169 que corresponde a la cuenca del Río Coco, la cual es donde se encuentra localizada la microcuenca del río El Varillal. Así mismo, Espinoza (2017) estimó que el escurrimiento superficial en la unidad 95169 para el año 2015 fue de 65.5 mm año⁻¹, considerando el escenario pesimista (RCP 8.5) se espera que para el año 2050 este aumente a 73.09 mm año⁻¹, esto aumentaría la pérdida de suelo por erosión hídrica. Siendo esta unidad la que abarca la microcuenca El Varillal.

Según el “*Plan de manejo y gestión integral subcuenca Río Tapacalí*” elaborado por la Alianza por la Resiliencia en Nicaragua (2014), indica que la microcuenca presenta una forma alargada, el cual permite que la respuesta a los eventos lluviosos sea más lenta, ya que los escurrimientos recorren menos distancia hasta el cauce principal, por lo que el agua permanece menos tiempo en su área de captación. Los parámetros de relieve indican que se desarrollan crecidas lentas en la microcuenca.

En la investigación, “*Origen de suelos depositado en la subcuenca en el Río Tapacalí, Madriz, Nicaragua mediante el uso de la técnica de isotopos estables de compuestos específicos*” de Caballero y Villalobos (2018), encontró que los suelos presentes en la subcuenca son de orden alfisol, entisol y vertisol, los cuales favorecen a la escorrentía superficial, en su mayoría ocupada por pastizales y suelos descubiertos con pendientes mayores a 35% limitando así a la infiltración de agua al manto acuífero.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación desarrollada en la microcuenca del río El Varillal, San Lucas, Madriz, es de tipo cuantitativo no experimental, ya que se pretende valorar el comportamiento del escurrimiento superficial bajo diferentes escenarios climáticos e identificar el potencial futuro de las obras de cosecha de agua establecidas.

4.1. Ubicación del área de estudio

La microcuenca del río El Varillal se encuentra ubicada en las coordenadas UTM 534459.2 y 1481764.9. Está localizada en la parte alta del Río Coco, dentro de los municipios San Lucas (97 % de su territorio) y Somoto (3 % del territorio). Está conformada por tres comunidades rurales: Mal Paso, La Playa, Valle de Sonís. Dentro de su territorio se encuentran un total de 23 obras de cosecha de agua por escorrentía establecidas (Figura 1).

4.2. Características biofísicas

Según el “Plan de manejo y gestión integral subcuenca Río Tapacali” (Alianza por la Resiliencia, 2014), la microcuenca de río El Varillal presenta las siguientes características:

La geología está constituida por depósitos aluviales del cuaternario reciente que se presentan en los valles y planicies. En las cordilleras, las formaciones geológicas son Matagalpa, Coyol Superior e Inferior, Totogalpa, Rocas Intrusivas del Cretácico y Rocas Metamórficas del Paleozoico; cuya litología está dominada por rocas volcánicas de carácter ácido.

Según la clasificación de zona de vida de Holdridge ubica a la microcuenca El Varillal en dos zonas de vida: Bosque Seco Subtropical (BSSt), ocupa la mayor parte del área lo que representa un 90% de la superficie total; y, Bosque seco Subtropical Premontano, comprende la parte alta de la microcuenca (10% del área total). Presenta un clima de sabana tropical, con temperaturas que oscilan entre 24° y 25°C. Las precipitaciones que varían entre los 630 y 800 mm anuales.

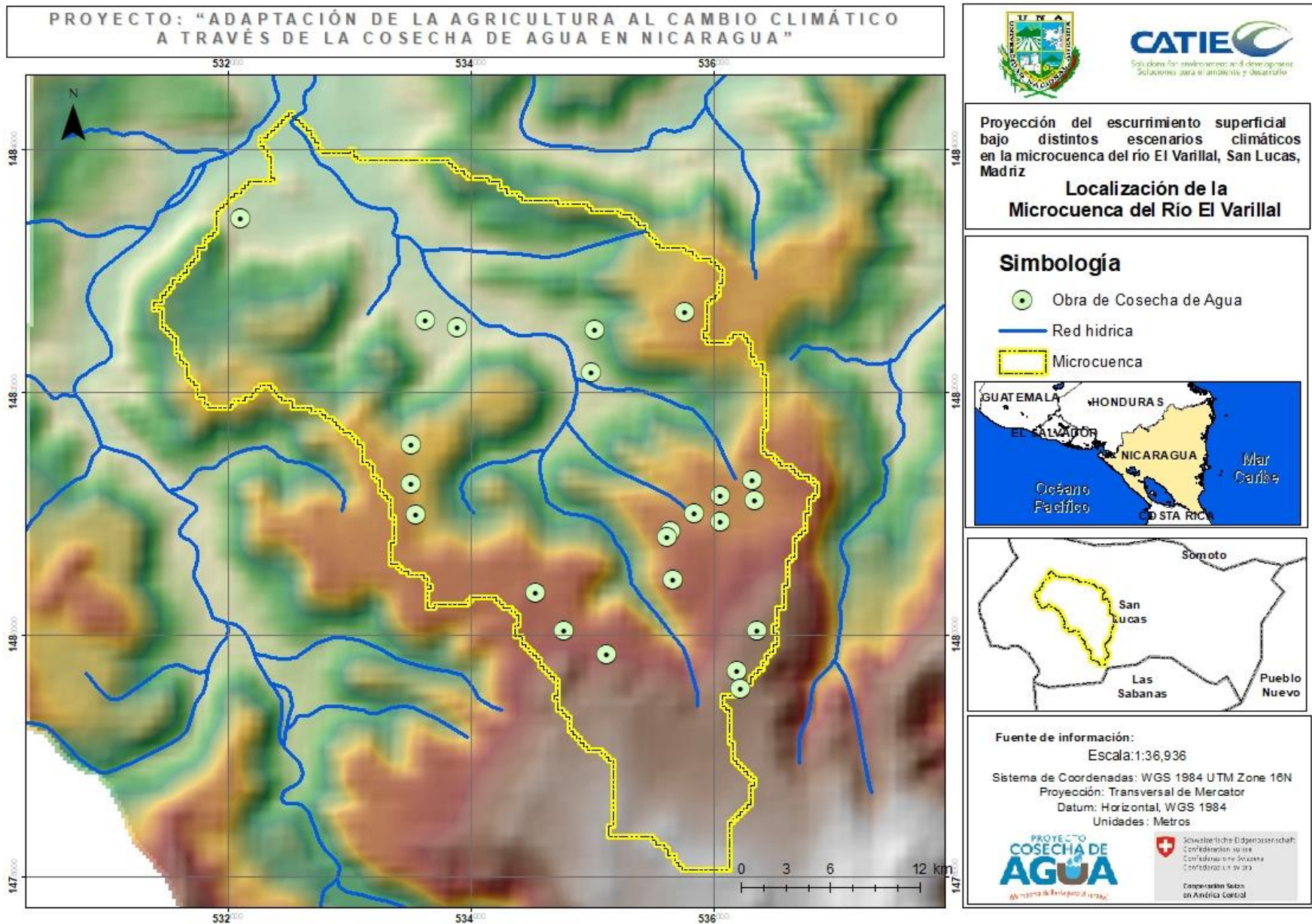


Figura 1. Ubicación geográfica de la microcuenca del río El Varillal

4.3.Diseño metodológico

La Herramienta de Evaluación de Suelos y Agua (SWAT) es un modelo de dominio público desarrollado conjuntamente por el servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA-ARS) y Texas A&M AgriLife Research, parte del sistema universitario (Texas A&M). Es un modelo semidistribuido, diseñado para simular la calidad y cantidad de agua superficial y subterránea y predecir el impacto ambiental del uso de la tierra, las prácticas de manejo de la tierra y el cambio climático en la producción de sedimentos y la contaminación del agua con agroquímicos. (Espinoza, 2017)

El modelo hidrológico SWAT permite pronosticar el impacto del manejo del suelo en la generación de sedimentos y regulación del agua en la microcuenca. Este genera unidades de respuestas hidrológicas acorde al uso de suelo, tipo de suelo y relieve, permitiendo así determinar el aporte de agua en términos de escurrimiento superficial. A partir de esta variable, se infirió la viabilidad de las obras de cosechas de agua por escorrentía, considerando escenarios climáticos futuro.

4.3.1. Recopilación de datos

En la figura 2, se muestra los insumos requeridos para realizar la modelación con SWAT. A continuación, se detallan las actividades dirigidas a la recopilación de los datos requeridos por el modelo hidrológico, así como las actividades de procesamiento y análisis.

Revisión documental

Consistió en la recopilación de fuentes secundarias de información tales como investigaciones previas, informes municipales, entre otros, sobre temáticas tales como cambio del uso de la tierra, monitoreo de aguas superficiales, registro de eventos climáticos extremos en un periodo entre 10 a 20 años.

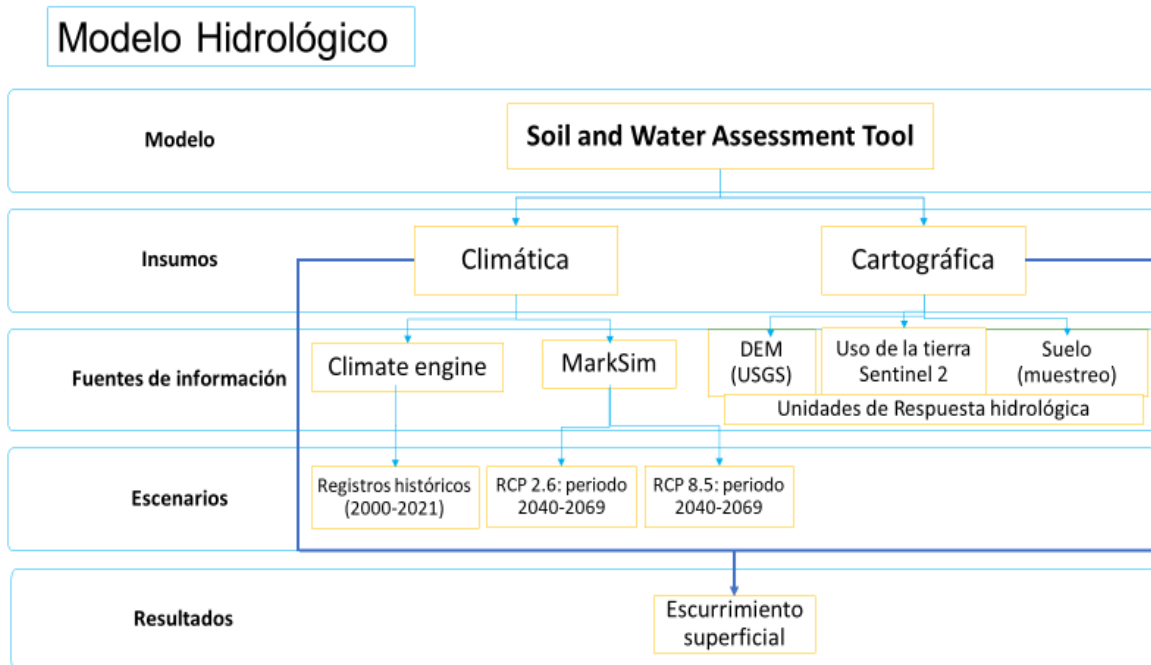


Figura 2. Flujograma del modelo hidrológico SWAT.

Recopilación de datos climáticos

Las variables climáticas requeridas fueron precipitación, temperatura, radiación solar y velocidad del viento. Los datos diarios de estas variables se obtuvieron de los generadores climáticos CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), CFS Reanalysis (Climate Forecast System) y MarkSim.

Escenario climático actual

La descarga de las variables climáticas del periodo de 2000 a 2021 se realizó a través de Climate Engine, el cual alberga varios dataset disponibles de manera gratuita. A continuación, se presenta los dataset utilizados y las variables descargadas.

Cuadro 1. Dataset de Climate Engine utilizados para la modelación hidrológica.

Dataset de Climate Engine	Variable climática descargada
CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data)	Precipitación diaria
CFS Reanalysis (Climate Forecast System)	Temperatura máxima y mínima, velocidad del viento y radiación solar

Escenarios climáticos futuros

Los escenarios climáticos son una descripción estimable que nos permite conocer el desarrollo a futuro del cambio climático, reuniendo un conjunto de variables y supuestos sobre fuerzas relacionadas, siendo una de las principales herramientas de la investigación prospectiva, la cual permite prever lo que ocurrirá si se presentan cada uno de los eventos modelados.

El periodo analizado fue del 2040 al 2069, puesto que acorde a las Sendas Representativas de Concentración (RCP, por sus siglas en ingles) en este periodo se presenta mayor variación entre los escenarios. Para la descarga de las variables climáticas se utilizó MarkSim® DSSAT weather file generator, el cual es un generador de datos climáticos futuros a nivel mundial.

Acorde al V reporte del IPCC (2015) afirma:

Los RCPs utilizados para hacer proyecciones basados en el crecimiento demográfico, económico, estilos de vida, uso de energía, patrones del uso del suelo, tecnología y política climática, describen cuatro trayectorias distintas en el siglo XXI de las emisiones y las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, las emisiones de contaminantes atmosféricos y el uso del suelo. Dichas trayectorias incluyen un escenario de mitigación estricto (RCP2.6), dos escenarios intermedios (RCP4.5 y RCP6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5) (Figura 3).

Los RCPs seleccionados para la modelación hidrológica fueron el RCP2.6 y RCP8.5, con la finalidad de comparar el comportamiento del escurrimiento superficial en dos escenarios de cambio climático contrastantes, con el escenario histórico.

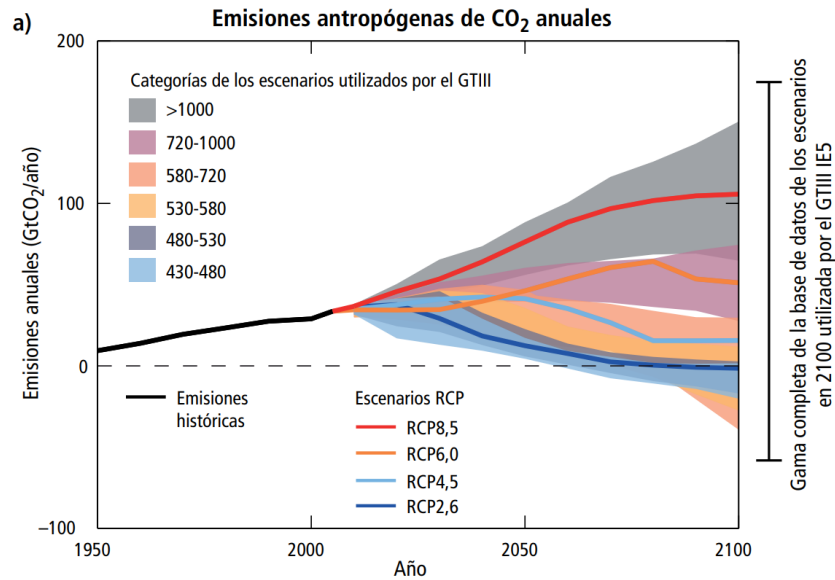


Figura 3. Trayectorias de concentración representativas (RCP).
Fuente: V reporte del IPCC, (2015).

Caracterización morfométrica

La caracterización de la cuenca parte de su delimitación a partir de un DEM (modelo digital de elevación), con una resolución de 30 m el cual fue descargado de la base de datos de Servicios Geológicos de Estados Unidos (USGS). Con el DEM se obtuvo información tal como: pendientes de la microcuenca, delimitación de la red de drenaje.

Con el uso del software ArcGIS® se determinaron los parámetros de forma, relieve y drenaje tales como: área, perímetro, índice de compacidad, pendiente media de la cuenca, elevación media, número de corrientes, orden de corriente, densidad de drenaje, densidad de corriente y pendiente media del cauce.

Parámetros de forma

Gámez (2010) afirma que:

La forma de la cuenca tiene fundamental importancia en la cantidad de escorrentía para una misma área y una intensidad de lluvia, dado que una cuenca pequeña y redondeada, tenderá a concentrar con mayor rapidez sus escurrimientos, en contra de una alargada que tardará más tiempo en llevarlos a su punto de salida.

El factor de forma se determina con la siguiente expresión

$$K = 0.28 * P / \sqrt{A}$$

Dónde:

K: coeficiente de Gravelius

P: perímetro de la cuenca en km

A: área de la cuenca en km²

Con el valor obtenido de la ecuación, se identifica la forma de microcuenca a partir de la siguiente clasificación.

Cuadro 2. Índice de compacidad o coeficiente de Gravelius

Valores K	Tipos de clases o formas
de 1.00 a 1.25	de casi redonda a oval redonda
de 1.00 a 1.50	de oval redonda a oval oblonga
de 1.00 a 1.75	de oval oblonga a rectangular oblonga

Fuente: Gámez, 2010

Parámetros de Relieve

La elevación media “esta es una característica que está relacionada con la temperatura y la precipitación, a su vez la variación de la temperatura influye en la variación de pérdidas de agua por evaporación.” (Gámez, 2010). Para la obtención de elevación media se utiliza un plano topográfico altimétrico, que permite obtener la curva área-elevación conocida como curva hipsométrica.

Gámez (2010) indica que:

La pendiente media de la cuenca constituye una característica importante puesto que condiciona la velocidad del escurrimiento superficial y subterráneo y en un momento dado, predice la erosión que este produce en función del uso y manejo que se puede dar al suelo de sus vertientes. Este se obtuvo a partir de la media de la pendiente generada por el Modelo de Elevación Digital (DEM).

Parámetros de drenaje

Los órdenes de corrientes se definieron según los criterios sugeridos por Horton (1945). Este consiste en identificar y asignar números a cada orden de corriente, como primer orden aquellos que no tienen tributarios; segundo orden, aquellas corrientes con dos o más tributarios.

La Densidad de drenaje es la función de la densidad y características estructurales de la roca, especialmente grado de fracturación. Esta depende de la cantidad de concentración de la precipitación, vista en conexión con las características del drenaje interno y externo del suelo, está influido con el relieve y cobertura vegetal (Gámez, 2010). Se obtuvo con la aplicación de la siguiente relación:

$$Dd = Lc/A$$

Donde:

Dd: densidad de drenaje, en $Lc \text{ km}^{-2}$

Lc: longitud total de las corrientes, en km

A: área de la cuenca, en km^2

‘La Densidad de corriente indica la eficiencia de drenaje de una cuenca, pero debe manejarse con criterio, dependiendo de la longitud y su disposición de sus corrientes’ (Gámez, 2010). Se obtuvo con la relación del número de corriente y el área drenada.

$$Dc = Nc/A$$

Donde:

Dc: densidad de corrientes, en $Nc \text{ km}^{-2}$.

Nc: número de corrientes.

A: área total de la cuenca, en km^2 .

Gómez (2010) afirma que. “La pendiente del cauce principal es la relación que existe entre las diferencias de elevaciones de los extremos de la corriente y lo longitud horizontal del cauce”

La ecuación utilizada fue:

$$S=(H/Lr) *100$$

Donde:

S: pendiente del cauce, en porcentaje

H: desnivel entre los extremos del cauce, en metros

Lr: longitud del horizontal del cauce en metros

Clasificación del uso actual del suelo

Para esta clasificación fue necesaria la descarga de una imagen satelital de Sentinel II de noviembre del 2021 de la Plataforma de Explorador de la Tierra, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, con el fin de hacer una clasificación asistida para determinar los diferentes usos del suelo.

Se clasificaron los diferentes usos actuales del suelo a partir del método de clasificación supervisada con la regla de decisión “Máxima verosimilitud”. Se utilizó la metodología del programa regional REDD/CCAD-GIZ (2014), para la verificación del mapa de uso actual de suelo, fue elaborado a través del levantamiento de puntos de control de diferentes coberturas de usos del suelo existentes en el área de estudio.

Caracterización de suelos

La caracterización del suelo se realizó en dos momentos: muestreo y descripción detallada del suelo. El primer momento se realizó siguiendo la metodología para el muestreo por toposecuencia con barrenadas descrita por UNA y CRS (2017). Las variables recopiladas fueron: textura, color (seco y húmedo), consistencia (seco y húmedo), estructura y pedregosidad.

Las pruebas de infiltración en campo se realizaron utilizando los pasos descritos por la Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo (USDA.1999), se utilizó el método del anillo sencillo. Se realizaron 12 pruebas de infiltración distribuidas en la microcuenca por uso del suelo. Los resultados obtenidos fueron comparados con el cuadro 3, propuesto por la FAO (1984) y modificado por Mendoza (2014).

Posterior al muestreo, se procedió a identificar los suelos representativos según las diferencias morfológicas observadas durante el muestreo. La descripción detallada del suelo se realizó mediante el uso de la “Guía para la descripción de suelos”, de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (2009).

Cuadro 3 clases y tasas de infiltración y su relación con el potencial de erosión de suelo

Tasa de infiltración mm/h	Clase de infiltración	Potencial de escorrentía superficial
508	Muy rápida	Mínima
152 a 508	Rápida	Leve
50 a 152	Moderadamente rápida	Moderada
15 a 50	Moderada	severa
5 a 15	Moderadamente lenta	Muy severa
1.5 a 5	Lenta	Alta
0.003 a 1.5	Muy lenta	Muy alta
<0.04	Impermeable	Extremadamente alto

Fuente: Mendoza, R. (2014).

Las variables descritas fueron las siguientes:

- Externas: drenaje superficial, pendiente, pedregosidad superficial, erosión, uso actual, humedad, posición de relieve, elevación, relieve.
- Internas: profundidad, limite, drenaje, profundidad, topografía, textura, estructura, consistencia, pH, color, roca, poros, raíces carbonato de calcio y materia orgánica.

Para cada perfil descrito se tomó muestras de los horizontes, las cuales fueron enviadas al Laboratorio de Suelo y Agua (LABSA) donde se analizaron las siguientes variables físicas y químicas: capacidad de campo, punto de marchitez permanente, porcentaje de arcilla, limo y arena, clase de textura, conductividad eléctrica, pH, materia orgánica, potasio, calcio, magnesio y capacidad de intercambio catiónico.

Al obtener los resultados de las muestras se clasificó los perfiles de suelo con la “Clave para la Taxonomía de suelos” del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (2014) en el cual se establecen niveles jerárquicos: Orden, Suborden, Gran grupo, Subgrupo. En este estudio se clasificó los suelos hasta el nivel de Subgrupo taxonómico.

Monitoreo de caudales de ríos

Para el monitoreo de caudales se seleccionaron ocho puntos distribuidos a lo largo del río principal, con el fin de obtener mayor información representativa. Se efectuó de manera mensual desde el mes de agosto 2021 a abril 2022 mediante el método velocidad/superficie utilizando un molinete digital, modelo Global Water FP111 calibrado de fábrica.

Este método depende de la medición de la velocidad media de la corriente y del área de la sección transversal del canal, calculando a partir de la fórmula (Hudson, 1997):

$$Q = A * V$$

Dónde:

Q: caudal, en m³ s⁻¹

A: área de la sección transversal, en m²

V: velocidad de la corriente, en m s⁻¹

En la microcuenca se seleccionaron ocho puntos de monitoreo los cuales se presentan en el cuadro 4.

Cuadro 4 Puntos de monitoreo de caudales de la microcuenca del río EL Varillal

Punto de monitoreo	X	Y	Punto de monitoreo	X	Y
1	534591	1481501	5	534866	1482082
2	534585	1484519	6	533600	1483136
3	534785	1481742	7	533614	1483175
4	534890	1482106	8	532665	1484108

4.3.2. Procesamiento de datos en SWAT

Una vez organizado y depurado los datos, se llevó a cabo la ejecución del modelo mediante la extensión de ArcSWAT de ArcGis usando los formatos indicados en el cuadro 5.

Cuadro 5. Formato del archivo de entrada de datos al modelo SWAT

Nombre	Formato	Descripción
Precipitación (Pcp)	Hojas de texto	Milímetros diarios
Temperatura (tmp)	Hojas de texto	Temperatura mínima y máxima diaria
Solar (radiación)	Hojas de texto	Diario
Wind (viento)	Hojas de texto	Diario

Los datos climáticos históricos y futuros fueron descargados como archivos de texto de datos diarios para cada una de las variables (ver en anexos 4,5,6 y 7), los cuales fueron estructurados según el formato de SWAT en donde se considera solamente el día y la variable climática, teniendo en cuenta que el software cuenta con un archivo de texto para cada variable (*Pcp* para precipitaciones, *tmp* para temperaturas, *solar* para radiación y *wind* para viento), todos estos datos son puntuales debido a que fueron descargados según coordenadas específicas.

Con la capa de cobertura de usos del suelo, fue necesario realizar una relación según las características de usos actuales presentes en la microcuenca con las categorías de cobertura asignada por SWAT. En el cuadro 6 se observa la relación de los usos de suelo encontrados en la microcuenca y sus asignaciones en la base de datos del modelo.

Cuadro 6. Clasificación de coberturas según SWAT

Cobertura	Código SWAT
Bosque latifoliado	FRSD
Bosque fragmentado	FRST
Pastos arbolados, Pastos en Zonas inundables, Pastos limpios	PAST
Pastos enmalezados, Herbazal, Vegetación secundaria o en transición	RNGB
Aeropuerto, Red vial, ferroviarias y terrenos asociados, Tejido urbano discontinuo	URBN
Cuerpo de agua artificiales, Lagunas, lagos y ciénagas naturales, Ríos (5m), Zonas arenosas naturales	WATR
Zonas pantanosas	WETL

Fuente: SWAT, 2012

Para los órdenes de suelo no se realizó ningún tipo de homologación con la base de datos de SWAT, ya que los datos recopilados en campo fueron utilizados para delimitar los subgrupos taxonómicos en una capa vectorial, la cual fue incorporada a la base de suelo de SWAT de acuerdo a sus características físicas-químicas. En el cuadro 7 se puede observar los parámetros requeridos para el procesamiento de SWAT, lo cual fue necesario determinar mediante cálculos la textura, determinar su grupo hidrológico, la profundidad de sus horizontes, todo esto como características físicas y las características químicas del laboratorio tales como: porcentaje de carbono, arena limo, arcilla.

Para realizar la delimitación de a microcuenca mediante SWAT, fue necesario cargar el DEM en formato ráster en donde se reclasificaron las pendientes de acuerdo a los rangos siguientes rangos 0-4%, 4-8%, 8-15%, 15% a más.

Cuadro 7. Parámetros de suelos requeridos por la herramienta SWAT para cada tipo de suelo

Parámetro	Descripción
SNAME	Nombre del suelo
NLAYERS	Numero de capas que integran el suelo (suelo dominante más suelos secundarios)
HYDGRP	Grupo hidrológico al que pertenece el suelo
SOL_ZMX	Máxima profundidad de enraizamiento de perfil del suelo
ANION_EXCL	Fracción de la porosidad de la que se excluyen los aniones
SOL_CRK	Volumen grieta potencial o máximo del perfil del suelo expresado como una fracción del volumen total del suelo
TEXTURE	Clase textural
SOL_Z	La profundidad al fondo de la primera capa de suelo
SOL_BD	Densidad húmeda aparente
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible de la primera capa de suelo
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada de primera capa de suelo
SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico en la primera capa de suelo
CLAY	Contenido de arcilla
SILT	Contenido de limo
SAND	Contenido de arena
ROCK	Contenido de piedra
SOL_ALB	Albedo Húmedo del suelo
USLE_K	Erodabilidad del suelo (factor K)
SOL_EC	Conductividad eléctrica (dS/m)
SOL_CAL	Contenido de carbonato de calcio (CaCO ₃)
SOL_PH	Ph del suelo

Fuente: SWAT, 2012

Una vez procesados los datos de pendiente, uso actual del suelo y orden de suelo requeridos por ArcSWAT, se generaron las Unidades de Repuesta Hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés). SWAT genera subunidades, las cuales fueron definidas a partir de los puntos de muestro de caudal. Asimismo, procesa datos climáticos como precipitación, velocidad del viento, temperaturas y radiación solar, esto permite al modelo generar datos simulados sobre escenarios meteorológicos presentes en el área de estudio.

Ya que este modelo genera datos simulados, permite ajustar los valores en todos los parámetros que requiere la modelación. Una vez ejecutados los cambios pertinentes en los registros, es momento de realizar las simulaciones de acuerdo con un periodo y duración de tiempo deseados.

Caudales actuales y futuros

Para analizar el comportamiento de los caudales en la microcuenca del río El Varillal, se comparó los caudales circulantes medidos durante el monitoreo, con los caudales simulados por el modelo hidrológico SWAT bajo escenarios de clima actual y futuro. La comparación consistió en la identificación de las variaciones en los caudales obtenidos en los distintos escenarios evaluados.

Escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial representa la fracción de lluvia que se escurre en forma directa y varía apreciablemente entre una cuenca y otra debido a las condiciones de humedad iniciales. Sin embargo, la relación de características de usos, pendientes y vegetación podrán generar variaciones en el escurrimiento superficial.

Para analizar el escurrimiento superficial con el modelo hidrológico SWAT, se comparó los registros obtenidos con el histórico y los RCP2.6 y RCP8.5, para identificar las variaciones y los aportes de escurrimiento en cada subunidad hidrológica.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización biofísica de la microcuenca

A continuación, se presentan las características morfométricas, edáficas, climáticas y de uso del suelo de la microcuenca del río El Varillal.

5.1.1. Morfometría

Las características morfométricas de la microcuenca del río El Varillal, se presentan en el cuadro 8.

Cuadro 8. Características morfométricas de la microcuenca del río El Varillal

Parámetro	Unidad	Estimación	Parámetro	Unidad	Estimación
Parámetros de forma					
Área	Km ²	16.4	Factor de forma	Adimensional	0.35
Perímetro	Km	22.34	Coficiente de Gravelius	Adimensional	Oval oblonga
Parámetros de relieve					
Elevación	Msnm	Mínima: 704.2	Curva hipsométrica		Equilibrio-madura
		Media: 930.19			
		Máxima: 1,156	Pendiente media	%	21.07
Parámetros de drenaje					
Forma		Dendrítico		Corrientes	
		<i>Cauce principal</i>	Longitud de corriente	Km	13.27
Longitud	Km	6.78	Cantidad de corrientes	Unidad	11
			Densidad de Drenaje	Km km ⁻²	0.80
Pendiente media	%	6.66	Densidad de corriente	Corriente km ⁻²	0.66

Parámetros de forma

La microcuenca del río El Varillal cuenta con un área de 16.39 km², perímetro de 22.34 km. Según Gámez (2010) “clasifica a esta como una cuenca pequeña, por presentar una superficie menor a 50 km²”. El índice de compacidad según Gravelius es de 1.53, lo que indica que su forma es oval oblonga, quiere decir que el desplazamiento del agua en la red de drenaje es lento, por lo que debido a su área y forma es poco susceptible a crecidas o alto volúmenes de agua.

El factor de forma de la microcuenca es de 0.35, lo que indica que la forma es ligeramente alargada, este parámetro manifiesta como se concentra el escurrimiento superficial. Según Córdoba (2016) refiere que no es propensa a inundaciones al momento de presentar lluvias intensas, las descargas son de menor volumen ya que el cauce principal es más largo que los secundarios.

Parámetros de relieve

La microcuenca presenta una elevación mínima de 704.2 msnm y máxima de 1156 msnm. Presenta un relieve fuertemente accidentado, lo que favorece los procesos de escurrimiento desde las partes altas a las partes bajas.

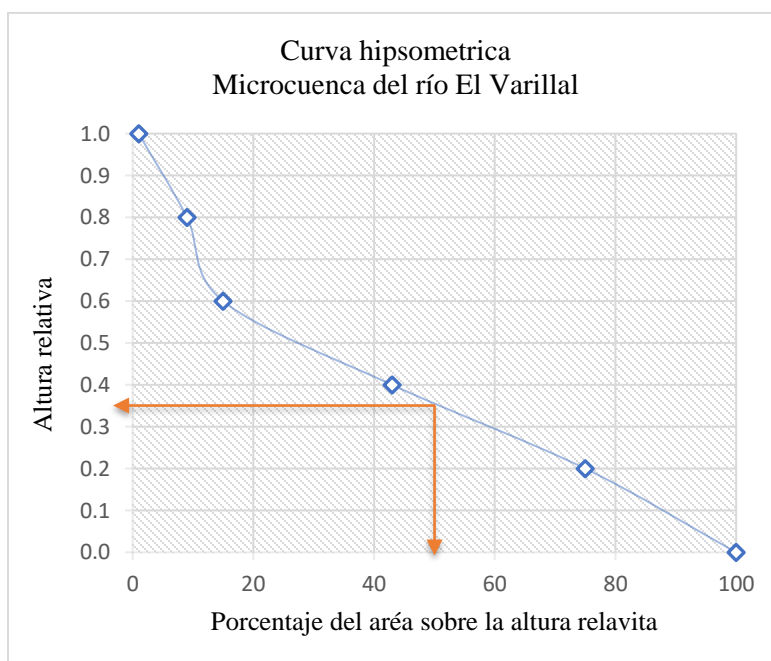


Figura 4. Curva hipsométrica de la microcuenca del río El Varillal.

Según la curva hipsométrica, presenta una elevación media correspondiente a los 930 msnm. La forma de la curva indica que se encuentra en un estado de equilibrio con tendencia sedimentaria, adicionalmente, se puede considerar que factores como: la elevación, relieve y la forma de la microcuenca facilitan el escurrimiento gradual del agua captada en su superficie hacia el cauce principal, esto reduce el riesgo de inundaciones y desbordamiento del río aguas abajo.

La pendiente media de la microcuenca es de 21.07 %. Según Gámez (2010) la clasifica como una microcuenca con terreno fuertemente accidentado, las características que esta presenta condicionan la velocidad del escurrimiento superficial hacia la parte baja de la microcuenca

Parámetros relacionados con la red de drenaje

La microcuenca del río El Varillal presenta un patrón de drenaje dendrítico, ya que presenta características de suelos pocos permeables, arcillosos, afloramiento rocoso y pendientes desde bajas a escarpadas.

Según Gámez (2010) afirma que:

Este patrón se forma normalmente en materiales y formaciones con las siguientes características: granulación fina, material homogéneo, permeabilidad relativamente baja, topografía, roca dura homogénea con resistencia uniforme a la erosión y el drenaje corre en todas direcciones, como por ejemplo en las lutitas, arcillas, limonitas, granito y toba volcánica.

La pendiente media del cauce principal es de 6.66 % y su longitud es de 6.78 km. Estas características indican que la microcuenca no es propensa a inundaciones, la respuesta ante un evento climático es lenta desde el punto de inicio al punto de la desembocadura.

La longitud total de las corrientes es de 13.27 km² con un total de 11 corrientes intermitentes. Presenta una densidad de drenaje es de 0.80 km km⁻², Hernández (2006) sugiere que valores cercanos a los 0.5 km km⁻² pertenecen a una cuenca pobremente drenada, mientras que un valor mayor de 3.5 km km⁻² los considera cuenca bien drenadas. La densidad de corriente es de 0.66 corriente km⁻², clasifica a la microcuenca con drenaje bajo debido a sus condiciones topográficas.

5.1.2. Recurso Edáfico

En la microcuenca del río El Varillal se identificó dos órdenes de suelo: Vertisol ocupando 5.319 km² del área total de la microcuenca, y Entisol con 11.076 km². (Figura 5, Cuadro 9).

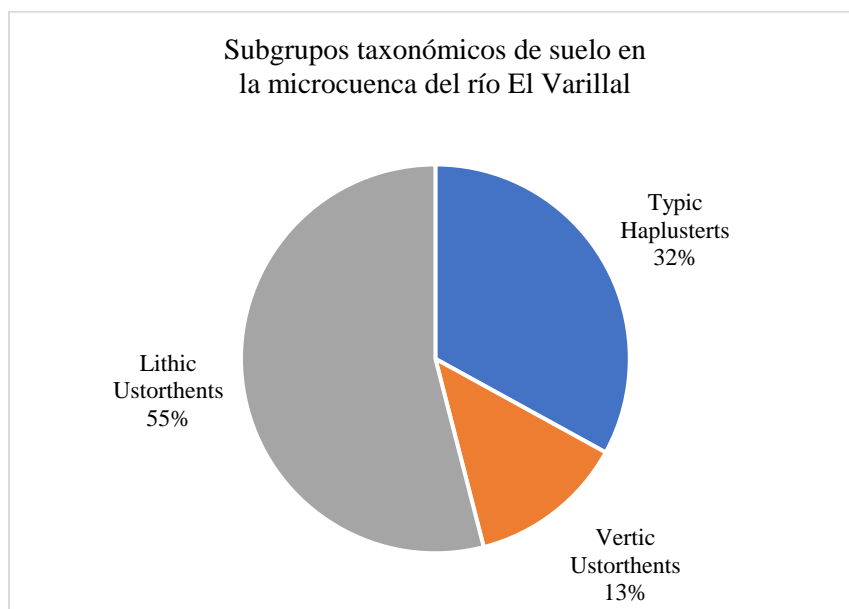


Figura 5. Distribución porcentual de los subgrupos taxonómicos presentes en la microcuenca El Varillal

En general, los suelos de la microcuenca del río El Varillal, son pocos profundos, con afloramiento rocosos y con clases texturales con predominancia de arcilla, lo que favorece el escurrimiento superficial del agua. Dado a estas características físicas del suelo propician el almacenamiento de agua en las obras, debido a la impermeabilidad.

Cuadro 9. Subgrupos taxonómicos presentes en la microcuenca del río El Varillal

Orden	Subgrupo taxonómico	Área (km ²)	Porcentaje
Entisol	Lithic Ustorthents	8.895	54.3
	Vertic Ustorthents	2.181	13.3
Vertisol	Typic haplusterts	5.319	32.4
Total		16.395	100

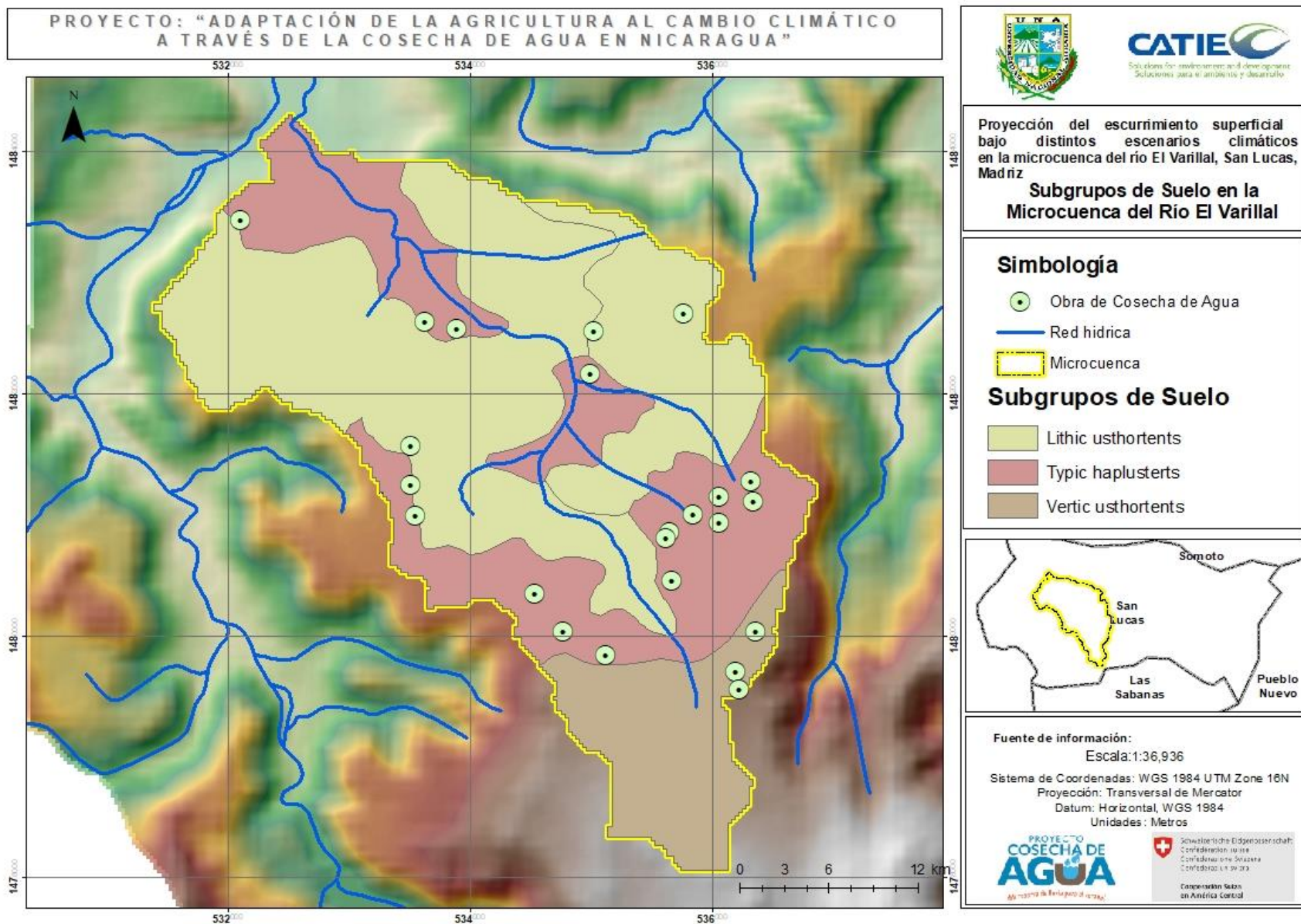


Figura 6. Subgrupos taxonómicos de suelos presentes en la microcuenca del río El Varillal.

Suelos vertisoles

Por la geografía de la microcuenca, los suelos vertisoles se encuentran desde la parte media baja, hasta media alta. Este orden corresponde a suelos profundos, fértiles y con alto contenido de arcilla expandible que forman grietas que se abren y cierran con cambios de humedad.

El subgrupo taxonómico presente en la microcuenca es *Typic Haplusterts*, perfil con características típicas del orden Vertisol, mínimo requerimiento de desarrollo. Régimen de humedad Ústico, suelo húmedo durante la estación lluviosa y seco por seis meses. Ocupan el 32.4% del área total de la microcuenca.

Perfil representativo del subgrupo taxonómico Typic Haplusterts

El perfil descrito se encuentra ubicado en la comunidad La Playa, en las coordenadas UTM 533282 y 1483835, a una elevación de 718 msnm, dado a su posición de relieve que es la parte baja de la cuenca y con relieve plano presenta pendientes de 0 a 2 %. Actualmente está siendo utilizado por árboles dispersos y pasto naturales, presentando un grado de erosión ligero, con un drenaje superficial moderado y drenaje interno imperfecto. La pedregosidad superficial oscila entre los 30 y 40 % de cobertura, sin embargo, presenta pocas rocas dentro del perfil.



Figura 7. Paisaje representativo del suelo Typic Haplusterts, comunidad La Playa.

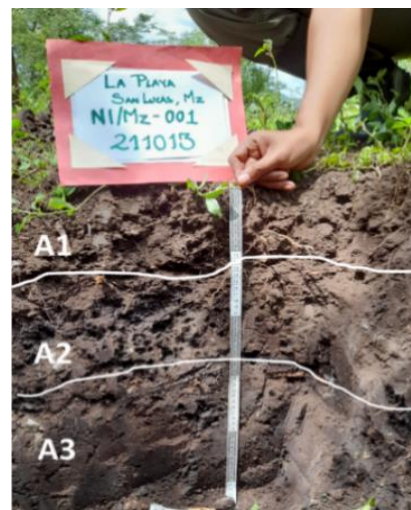


Figura 8. Perfil de suelo typic Haplusterts, comunidad La Playa.

Cuadro 10. Descripción del perfil del subgrupo Typic Haplusterts en la comunidad La Playa, San Lucas, Madriz

Horizonte	Descripción
A 0-11 cm	Color gris muy oscuro en seco (7.5 YR 3/1) y negro en húmedo (7.5 YR 2.5/1); textura Franco Arcilloso; estructura masiva con fuerte resistencia. De consistencia dura en seco, friable en húmedo, adhesivo y ligeramente plástico en mojado. Presenta muy pocas rocas en el horizonte, con muy pocos poros vesiculares muy finos, limite difuso y ondulado. Capacidad de campo de 33.12% y Punto de Marchitez Permanente de 20.84 %. Con pH neutro (6.82), contenido medio de materia orgánica (3.78%), conductividad eléctrica de (75.4 μ s/cm), contenido alto de potasio (1.20 meq/100g), contenido alto de Calcio (27.47meq/100g) y contenido alto de Magnesio (5.58meq/100g), contenido de Sodio 0.34 meq/100g. La capacidad de intercambio catiónico es alto (36.33 meq/100g suelo).
A2 11-28 cm	Color negro pardusco en seco (5 YR 3/1) y negro en húmedo (10YR 2/1); textura arcillosa; estructura fuerte y masiva. De consistencia duro en seco; friable en húmedo, ligeramente adhesivo y plástico en mojado. Presenta poros vesiculares muy finos, muy pocos; pocas raíces finas, limite difuso. Capacidad de campo de (37.77% meq/100g) y punto de marchitez permanente un 25.62%. Con pH neutro (7.16), contenido pobre de materia orgánica (2.17%). Conductividad eléctrica de (40.3 μ s/cm), contenido alto de potasio (0.68 meq/100g), contenido alto de Calcio (29.87 meq/100g) y contenido alto de magnesio (8.57 meq/100g), Sodio (0.35meq/100g); con la capacidad de intercambio catiónico es alta (38.74meq/100g).
A3 28+ cm	Color negro en seco (10YR 2/1) y café muy oscuro en húmedo (10YR 2/2); de textura Arcillosa; estructura fuertemente resistente y masiva. De consistencia dura en seco, con firmeza en húmedo. Presenta poros intersticiales finos y pocos, limite difuso. Capacidad de campo del (47.00%) y punto de marchitez permanente de (20.95%). Con pH muy ligeramente alcalino (7.30), contenido pobre de materia orgánica (1.16 %), contenido alto de potasio (0.48 meq/100g), contenido alto de calcio (36.18 meq/100g) y contenido alto de magnesio (5.08 meq/100g). Sodio 0.91, alta Capacidad de intercambio catiónico (49.34meq/100g suelo). Conductividad eléctrica de 54.2 μ s/cm.

Otros suelos Typic Haplusterts



Figura 9. Cosecha de agua establecido en un suelo Typic Haplusterts, comunidad Mal Paso, cerro Misalguato.

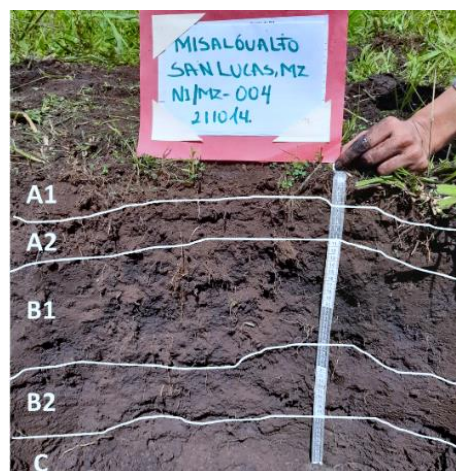


Figura 10. Perfil de suelo Typic Haplusterts, comunidad Mal Paso, cerro Misalguato.

El perfil se encuentra en la comunidad Misalguato en las coordenadas UTM 535881 y 1480991 y con una elevación de 963 msnm. Se encuentra en una ladera de la parte media de microcuenca, con pendiente de 11 % y con baja pedregosidad del 10 %. Internamente presenta humedad relativa y un drenaje superficial moderado, con un grado de erosión moderado. Su uso actual es pasto y árboles dispersos.

Cuadro 11. Descripción del perfil del subgrupo Typic Haplusterts en la comunidad de Mal Paso, San Lucas, Madriz

Horizontes	Descripción
A1 0-5 cm	Color negro (7.5 YR 3/2) y negro en húmedo (10YR 2/1); textura arcillosa; estructura masiva con fuerte resistencia. De consistencia dura en seco y friable en húmedo, adhesivo y ligeramente plástico en mojado. Presenta pocos poros finos de tipo cavidades e intersticiales, y raíces finas, limite difuso y ondulado. Presenta una capacidad de campo del 25.29%, y punto de marchitez permanente 11.06 % pH ligeramente ácido 5.26, contenido alto de materia orgánica (6.85%; alto contenido de Potasio (0.37 meq/gr suelo), alto contenido de Calcio (20.56 meq/gr suelo), alto contenido de Magnesio (4.46meq/gr suelo), contenido de Sodio de 0.37 meq/gr suelo, conductividad eléctrica (33.043μS/cm) y Capacidad de intercambio catiónico de 21.78 meq/gr
A2 5-10 cm	Color negro pardusco en seco 10YR 3/1 y negro en húmedo 10YR 2/1; de textura arcillosa; de estructura fuerte y con de bloques subangulares; ligeramente duro en su consistencia en seco, friable en húmedo, no adherente y ligeramente plástico en mojado; de poros vesiculares, finos a muy finos pocos; con raíces de tamaño medio y muy pocas, limite difuso y ondulado. Presenta una capacidad de campo de 26.42% y un punto de marchitez permanente de 13.77%, pH muy ligeramente ácido (5.32), contenido medio de materia orgánica (5.28%), alto contenido de potasio (0.26 meq/gr suelo), conductividad eléctrica de 28.63 μS/cm. q/gr, alto contenido de Calcio (19 meq/100g suelo), alto contenido de Magnesio (3.93 meq/gr suelo), contenido de Sodio de (0.34 meq/gr suelo), capacidad de intercambio catiónico de 24.05 meq/gr.
Bw1 10-26 cm	Color negro 7.5YR 2.5/1 en seco y negro 10YR 2/1 en húmedo; con textura Arcillosa; con una estructura moderadamente resistente y de tipo de bloque angular; de consistencia friable en húmedo, no adherente y plástico en mojado; ningún tipo de roca, de poros vesiculares, muy finos y muy pocos en el horizonte; y de raíces muy finas y muy pocos. Presencia de una cantidad común de poros de tipo intersticiales finos, y raíces pocas y muy finas, limite difuso. Con una capacidad de campo de 33.21% y punto de marchitez permanente de 15.18 %. pH ligeramente ácido (5.33), con un contenido de materia orgánica pobre 4.38, contenido medio de Potasio (0.19 meq/gr suelo), conductividad eléctrica de 20.42 μS/contenido medio de Calcio (18.34meq/gr suelo), contenido medio de Magnesio (4.49meq/gr suelo), contenido de Sodio de 0.38meq/gr suelo, capacidad de intercambio catiónico de 25.57meq/gr.
Bw2 26-40 cm	Color negro 10YR 2/1 en húmedo; textura Arcillosa como, de estructura fuerte y de tipo bloque subangular; friable en su consistencia en húmedo, no adherible ni y plástico en mojado; presenta poros vesiculares, finos y pocos; con presencia de raíces finas y muy pocas, limite difuso y ondulado. Con una capacidad de campo de 27.79 % y punto de marchitez permanente de 13.19 %, pH fuertemente ácido (5.32), contenido alto de materia orgánica 4.59, conductividad eléctrica de 21.50 μS/cm, contenido alto de Potasio (0.24meq/gr suelo), contenido alto de Calcio (19.60meq/gr suelo), contenido alto de Magnesio (4.03 meq/gr suelo), un contenido de Sodio de 0.29meq/gr suelo, capacidad de intercambio catiónico de 22.53meq/gr suelo.

Horizontes	Descripción
C 40+	Color 5YR 3/1 en húmedo, textura completamente arcillosa; con una resistencia estructural moderada y de tipo de bloque subangular; de consistencia muy friable en húmedo, no adherente y plástico; de poros vesiculares, muy finos y muy pocos, límites difuso y ondulado.

Suelos entisoles

Suelos con poco desarrollo y jóvenes. Se encuentran distribuidos en las áreas escarpadas de la microcuenca. En donde los subgrupos presentes son *Lithic Ustorthents* (contacto con la roca) Y *Vertic Ustorthents* (grietas dentro de la superficie del suelo mineral), ocupando el 67.6% del área total de la microcuenca.

Perfil representativo del subgrupo taxonómico Lithic Ustorthents

El perfil descrito se encuentra ubicado en la comunidad La Playa, en la Loma El Morroñoso, en las coordenadas UTM 534307y 1482647, a una altitud de 762 msnm. Los cuales representa el 54.3 % del área total de la microcuenca. Es común encontrarlos en lugares inclinados a escarpados con pendientes de 24 % y con un grado de pedregosidad en la superficie de 35 %. Actualmente está ocupado por árboles dispersos y pastos. Por las características del relieve presenta un grado de erosión moderada, drenaje superficial excesivo, y un drenaje interno moderado.



Figura 11. Paisaje representativo del suelo Lithic Ustorthents, en la comunidad La Playa



Figura 12. Perfil de suelo Lithic Ustorthents, comunidad La Playa.

Cuadro 12. Descripción del perfil del subgrupo Lithic Usthorvents en la comunidad La Playa, San Lucas, Madriz

Horizonte	Descripción
A 0-15 cm	Color negro pardusco en seco (5YR 3/1) y negro en húmedo (10YR 2/1), textura Franco Arcillosa de estructura fuerte, con bloques angulares; de consistencia dura en seco, firme en húmedo, ligeramente adhesivo y plástico en mojado, presenta pocas rocas, con poros de canales y vesiculares finos, muy finos y poca abundancia, limite abrupto y suave. Con una Capacidad de campo 32.55 y punto de marchitez permanente. Con pH neutro de 7.19; contenido alto de materia orgánica (5.25 %); contenido alto de Potasio (1.27meq/100g), Conductividad Eléctrica de (62.1 μ s/cm suelo), contenido alto de Calcio (27.69 meq/100g), alto contenido de: Magnesio alto (6.00 meq/100g), Sodio de 0.25; de capacidad de intercambio catiónico alta (36.98 meq/100g).
R 7+ cm	Material parental

Otros suelos Lithic Ustorthents

Este perfil está ubicado en las coordenadas UTM 535650 y 1481473, a una elevación de 940 msnm. La pendiente es muy escarpada (53.5 %), de moderada pedregosidad (30 %) en todo el terreno. Actualmente presentan bosques latifoliados, en donde se aprecia un grado de erosión moderado y con un drenaje superficial alto.



Figura 13. Paisaje representativo del suelo Lithic Ustorthents, en la comunidad Mal Paso.



Figura 14. Perfil de suelo Lithic Ustorthents, comunidad Mal Paso.

Cuadro 13. Descripción del perfil del subgrupo Lithic Ustorthents en la comunidad Mal Paso, San Lucas, Madriz

Horizontes	Descripción
A 0-19 cm	Color rojizo oscuro en seco (5YR 3/2) y negro rojizo en húmedo (2.5YR 2.5/1); textura Franco Arcillosa; estructura suave de consistencia suelta en seco y friable en húmedo adhesivo y ligeramente plástico en húmedo y de tipo bloque subangular. presenta poros vesiculares, finos y muy pocos; con raíces medias en tamaño y muchas, limite suave. Capacidad de Campo 30.08 % y punto de marchitez permanente de (23.02 %). Con pH muy ligeramente alcalino (7.20); contenido alto de materia orgánica (7.06 %); contenido pobre de Potasio (1.58 meq/100g suelo); contenido alto de Calcio (35.32 meq/100g suelo); contenido alto de Magnesio (5.84 meq/100g suelo), Sodio 0.29; capacidad de intercambio catiónico de (43.60 meq/100g suelo).
C 19-29 cm	Color rojo oscuro 2.5YR 3/3 en seco y marrón rojizo 5YR 3/3 en húmedo con textura Arcillosa; de estructura fuerte y en bloques subangulares; dura su consistencia en seco, firme en húmedo, no adherible y plástico en mojado. presenta poros intersticiales, finos y abundantes, raíces finas y muy pocas, limite abrupto y ondulado. Con Capacidad de Campo de 29.65 % y punto de marchitez permanente de 22.87 %. Con pH neutro de 7.00, contenido medio de Materia Orgánica (3.18 %). Conductividad Eléctrica de 51.4 μ s/cm. Contenido medio de Potasio (1.16meq/100g suelo), contenido alto en Calcio (31.75 meq/100g suelo), contenido alto de Magnesio (6.66 meq/100g suelo), Sodio de 0.44 meq/100g suelo) y alta capacidad de intercambio catiónico (38.30 meq/100g).
R 29+	Material parental

Perfil representativo del subgrupo taxonómico Vertic Ustorthents

Este perfil se encuentra ubicado en la comunidad de Mal Paso en las coordenadas UTM 535863 y 1479736, con una elevación de 1001 msnm. Representa el 13.3 % de área total de la microcuenca. Localizado en una ladera con pendiente de 26.5 %; debido a la escorrentía se aprecia afloración rocosa en un 80 % en el terreno.



Figura 15. Paisaje representativo del suelo Vertic Ustorthents, en la comunidad Mal Paso.



Figura 16. Perfil de suelo Vertic Ustorthents, en la comunidad Mal Paso.

El uso actual corresponde a potreros con árboles dispersos presentando evidencia de erosión severa y drenaje superficial excesivo; debido a la compactación del suelo, así como al alto contenido de arcilla en el horizonte superficial.

Cuadro 14. Descripción del perfil del subgrupo Vertic Ustorthents en la comunidad Mal Paso, San Lucas, Madriz

Horizonte	Descripción
O 0-3 cm	Suelo con materiales orgánicos (capa de hojarasca que descansa sobre la superficie del suelo)
A 3-22	Color negro 10YR 10/1 en húmedo.; de textura arcillosa; de estructura fuerte y de bloques angulares; de consistencias firme en húmedo, ligeramente adhesivo y poco plástico. Con rocas comunes dentro del horizonte, poros vesiculares e intersticiales, de tamaños medios y muy finos, limite difuso y ondulado. Capacidad de Campo de 38.91 % y punto de marchitez de (22.29 %); pH neutro de 6.83, contenido alto de materia orgánica (6.5%). Conductividad Eléctrica 51.7 $\mu\text{s}/\text{cm}$, contenido alto de Potasio (1.06 meq/100g), contenido alto de Calcio (22.09 meq/100g), contenido alto de Magnesio (6.76 meq/100g), Sodio 0.23, alta capacidad de intercambio catiónico (34.99 meq/100g)
R 22+	Material parental

5.1.3. Uso actual del suelo

En la microcuenca del río El Varillal, se encuentran ocho usos en el cual predominan los pastizales con un área de 59.01 %, seguido de bosque latifoliado con 17.38 % y vegetación arbustiva con un 17.42 % del área total de la microcuenca.

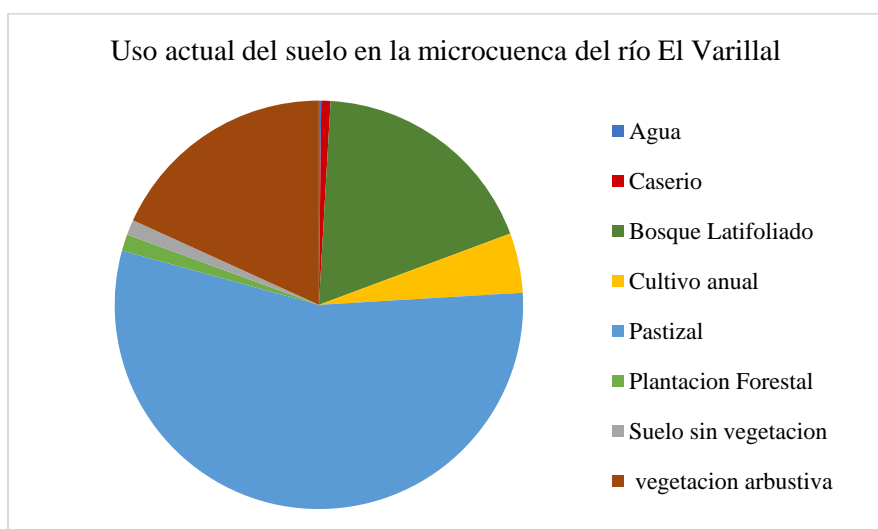


Figura 17. Distribución actual de usos de suelo en la microcuenca del río El Varillal

Se identificaron ocho usos del suelo, siendo solo cuatro las más predominantes con una extensión de 16.02 km² área total. Plantaciones forestales, caserío, suelo sin vegetación y agua las menos predominante ocupando una extensión 0.65 km² del área total.

Cuadro 15. Distribución de los usos del suelo en la microcuenca del río El Varillal.ç

Usos del suelo	Área (km ²)	Porcentaje (%)	Código de SWAT
Bosque latifoliado	2.84	17.38	FRSD
Vegetación arbustiva	2.85	17.42	RNGB
Plantación forestal	0.07	0.43	FRSD
Cultivo anual	0.64	3.88	AGRR
Pastizal	9.68	59.01	PAST
Suelo sin vegetación	0.19	1.19	BARR
Caserío	0.09	0.53	URLD
Agua	0.03	0.16	WATR
Total	16.39	100	

Pastizal



Figura 18. Fotografía representativa del uso Pastizal

Este uso de suelo es el de mayor incidencia debido al crecimiento agropecuario en la zona, ocupando una superficie de 9.68 km² que corresponde al 59.01% del área total. La distribución del pasto se encuentra en mayor extensión entre la parte alta y media de la microcuenca. Se encuentran sin manejo tecnificado.

Vegetación arbustiva



Figura 19. Fotografía representativa del uso Vegetación arbustiva

Este uso de suelo tiene una extensión de 2.85 km² que corresponde al 17.42% del área total. Localizado en su mayoría en la parte alta de la cuenca, donde se encontraron especies forestales comunes como: Naranjillo (*Citronella mucronata*), Júcaro (*Crescentia alata*) y Falso Roble (*Tabebuia rosea*)

Bosque latifoliado



Figura 20 fotografía representativa del uso Bosque latifoliado

Este uso de suelo se encuentra distribuido en pequeños parches por toda la microcuenca. ocupa una extensión de 2.84 km² que corresponde al 17.38% de la superficie total. Durante la observación en campo, se identificó que este uso está siendo sustituido por pastizales y potreros, además presenta una presión a causa de la extracción de leña.

Plantación Forestal

En el área de estudio se identificaron plantaciones forestales de Mandagual (*Caesalpinia velutina*), en cual está siendo manejado por el proyecto de captación de carbono. Ocupa una extensión de 0.07 km² que corresponde a 0.43% de la superficie total

Cultivo Anual



Figura 21. Fotografía representativa del uso Cultivo anual

El uso de suelo cultivo anual, tiene una extensión de 0.64 km² que corresponde a 3.88% del área total. Se distribuye cerca de las riberas de corriente de agua. Los cultivos son: Maíz (*Zea mays*), Frijol (*phaseolus vulgaris*), Sorgo (*sorghum*) y Ayote (*cucurbita argyrosperma*)

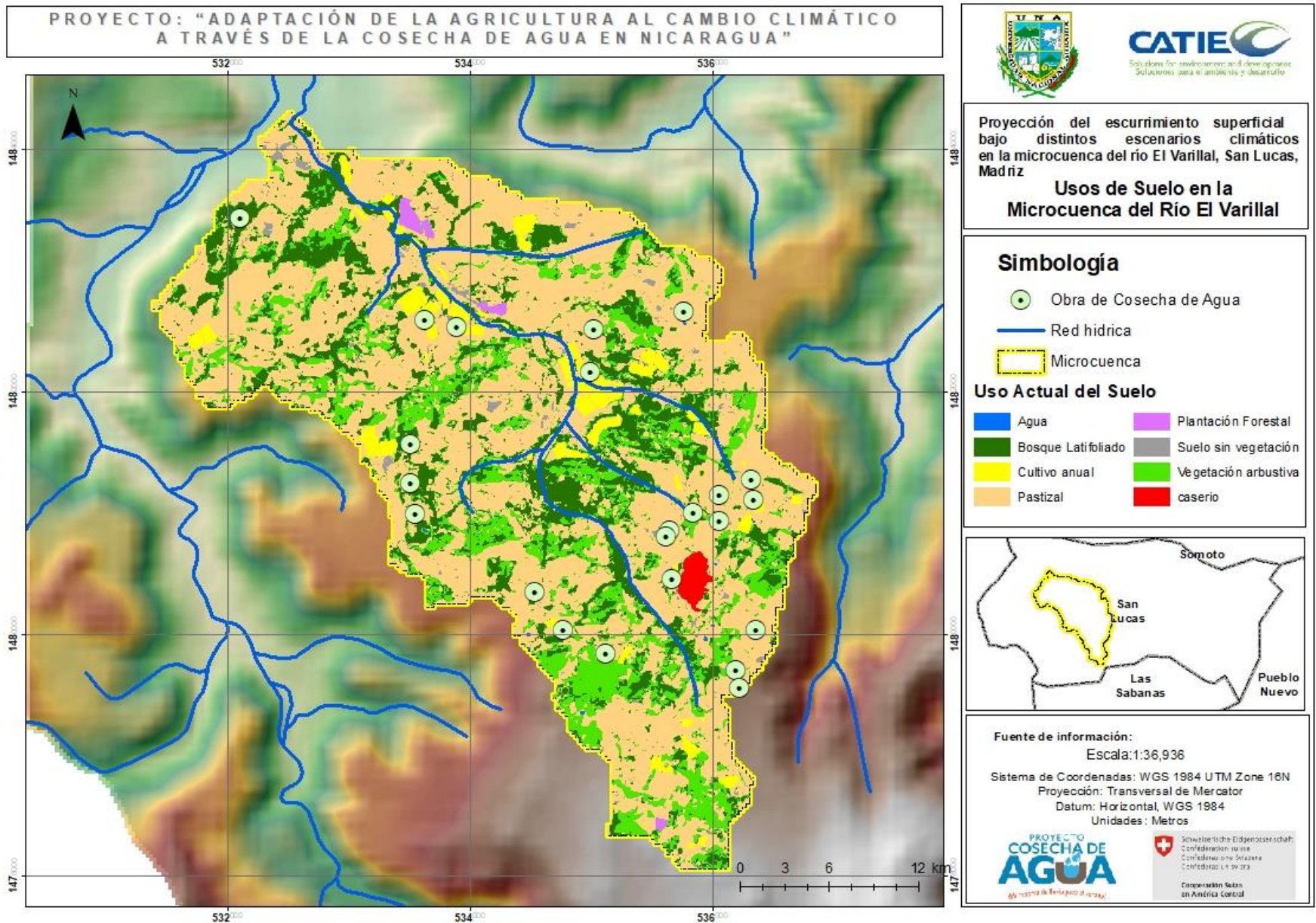


Figura 22. Usos del suelo en la microcuenca del río El Varillal, San Lucas, Madriz.

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

En el cuadro 16 se presentan los resultados de la velocidad de infiltración promedio por uso y orden de suelo.

Cuadro 16. Pruebas de infiltración por uso y subgrupo de suelo

Uso	N.º de muestra	Velocidad de Infiltración (mm h ⁻¹)	Orden
Bosque ripario	1	50.30	Vertisol
Pastos con árboles dispersos	4	29.94	Entisol
Cultivo anual	1	28.04	Entisol
Pasto	4	27.03	Entisol / Vertisol

El uso de la tierra en bosque presenta la mayor velocidad de infiltración con relación a los otros usos (50.30 mm h⁻¹) con un orden vertisol. Este aumento en la infiltración podría estar influenciado por las características de los suelos vertisoles, que presentan grietas principalmente en la época de verano. En el área de estudio se apreciaron grietas en diferentes puntos de la superficie. Es importante mencionar que en el punto donde se realizó la prueba de infiltración no se apreciaron grietas externas; sin embargo, podrían estar presente en su interior, aumentando de esta manera el valor de infiltración; por otro lado, en el área de la prueba se observó abundante hojarasca, condición que mejora la infiltración en los suelos.

En segundo lugar, el pasto con árboles dispersos presentó una velocidad de infiltración de 29.94 mm h⁻¹ con orden de entisol. Según Martínez Ruiz *et al.* (2006) al encontrarse suelos con cobertura vegetal (árboles) y herbáceas conllevan a una mayor disponibilidad de agua hacia el suelo, promoviendo la infiltración.

En el cultivo anual, la velocidad de infiltración es de 28.04 mm h⁻¹, con orden de suelo entisol es menor con relación a la velocidad de infiltración de los usos de bosque y pasto con árboles dispersos. Según Gómez *et al* (2014) los cultivos anuales presentan una infiltración baja debido a que generan poca cobertura vegetal, además de la compactación generada por la labranza.

El uso del suelo cubierto de Pasto, la infiltración es de 27,03 mm h⁻¹, con órdenes de suelo entisol/ vertisol. Gómez *et al.* (2014) afirma que “el grado de compactación y el manejo al que pudo estar sometido un suelo en años anteriores, conlleva a una baja tasa de infiltración producto de dicha alteración”.

Los resultados de la infiltración en la microcuenca El Varillal, encuentran entre 27.03 a 50.30 mm h⁻¹, Según Mendoza (2014), la infiltración se clasifica como moderadas y presentan un potencial de escorrentía superficial severa valores entre 15 a 50 mm h⁻¹; esto coincide con las condiciones presentada en la microcuenca. Estos valores de infiltración podrían estar influenciados por el tipo de suelo; poco profundo y textura arcillosa. También por las características físicas como: afloramiento rocoso, pendiente escarpadas y de igual manera el uso del mismo; disminuyendo la infiltración del agua y favoreciendo a la escorrentía superficial.

5.1.5. Balance hídrico

A continuación, se presentan los resultados producto de la comparación del registro histórico (periodo 2000-2021); así como, los escenarios climáticos RCP 2.6 y RCP 8.5 (2040-2069).

Escenario climático actual

En la figura 23 se presenta el balance hídrico histórico de la microcuenca del río El Varillal. Se observa para los meses secos, precipitaciones mínimas entre 0.72 mm en enero y 9.87 mm en diciembre. Entre mayo a octubre, las precipitaciones son más abundantes desde 201.2-226.07 mm; Sin embargo, en julio y agosto disminuyen los acumulados de precipitación.

La evapotranspiración real alcanza su valor máximo en mayo (193.96 mm) y septiembre (131.6 mm) debido al aumento de la temperatura. Los valores mínimos se observan en enero (6.20 mm) y febrero (3.13mm). Se observa en el balance un exceso entre junio 89.47 mm a octubre 109.83 mm y un déficit hídrico que se presenta en el periodo seco, alcanzando su máximo valor en abril (164.66 mm).

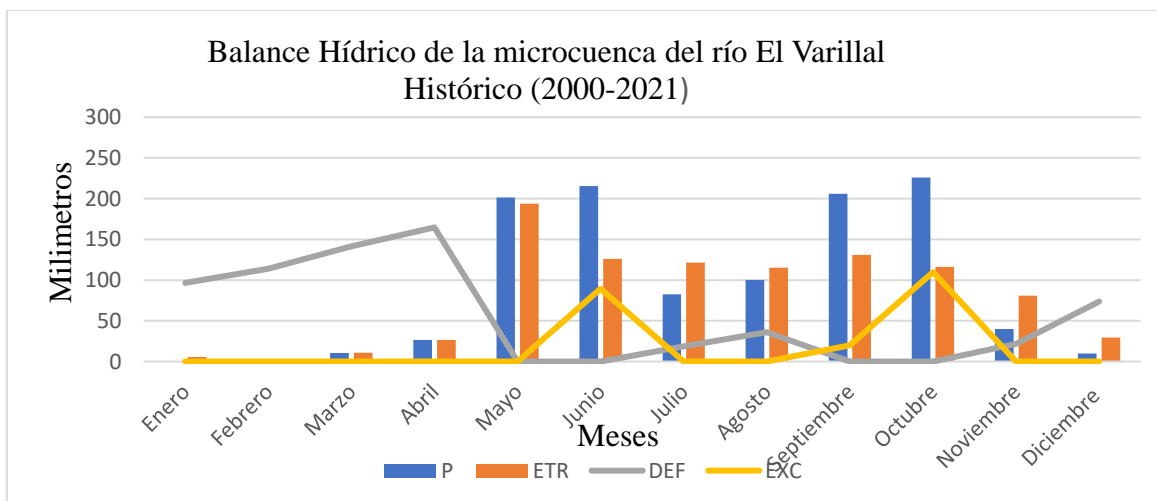


Figura 23. Balance hídrico de la microcuenca el Varillal, periodo 2000-2021.

Escenario climático futuro RCP 2.6

En la figura 24, se presenta el balance hídrico de la microcuenca del río El Varillal del escenario RCP 2.6.

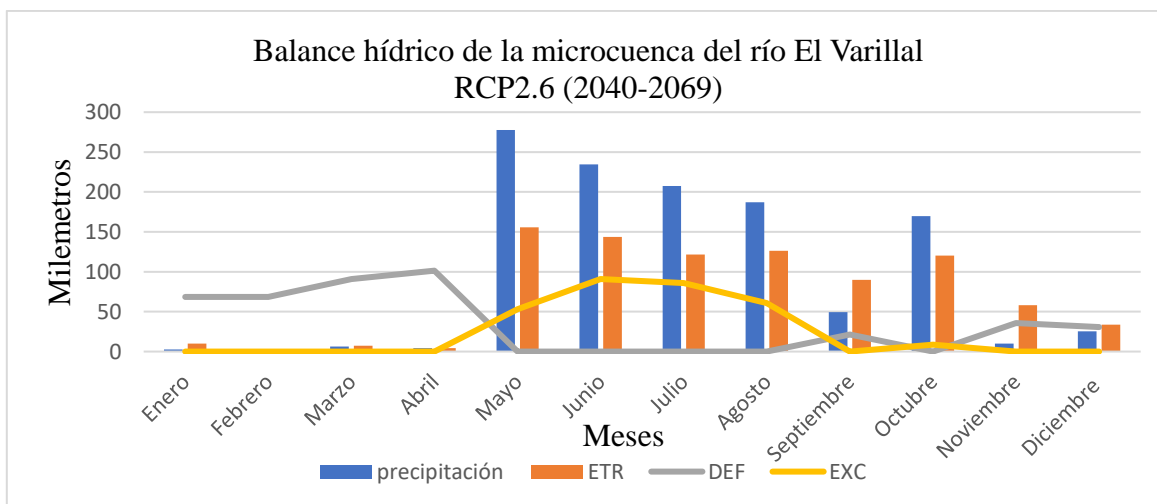


Figura 24. Balance hídrico de la microcuenca el Varillal bajo el escenario (RCP2.6)

Se observa para los meses secos, precipitaciones mínimas entre 2.8 mm en enero y máximo de 25.21mm en el mes de diciembre. Entre mayo y octubre las precipitaciones son más abundantes los rangos de precipitación se presentan desde 169.8mm (mínima) y 267.6mm (máxima). Sin embargo, disminuye en agosto y septiembre, en comparación con el escenario histórico en donde se observa la reducción en los meses julio y agosto.

La evapotranspiración real alcanza su límite máximo en los meses de mayo (155.55 mm) y junio (143.50 mm) debido al aumento de las temperaturas, los valores mínimos se presentaron en febrero (2.19 mm) y enero (4.40 mm).

Se observa en el balance un exceso anual de 299.24mm, siendo los meses con mayores excesos junio 90.89 mm y julio 85.92 mm y un déficit hídrico que se presenta en el periodo seco, alcanzando su máximo valor en abril (101.98 mm).

Escenario climático futuro RCP 8.5

En la figura 25, que presenta el balance hídrico de la microcuenca del río El Varillal del escenario RCP 8.5.

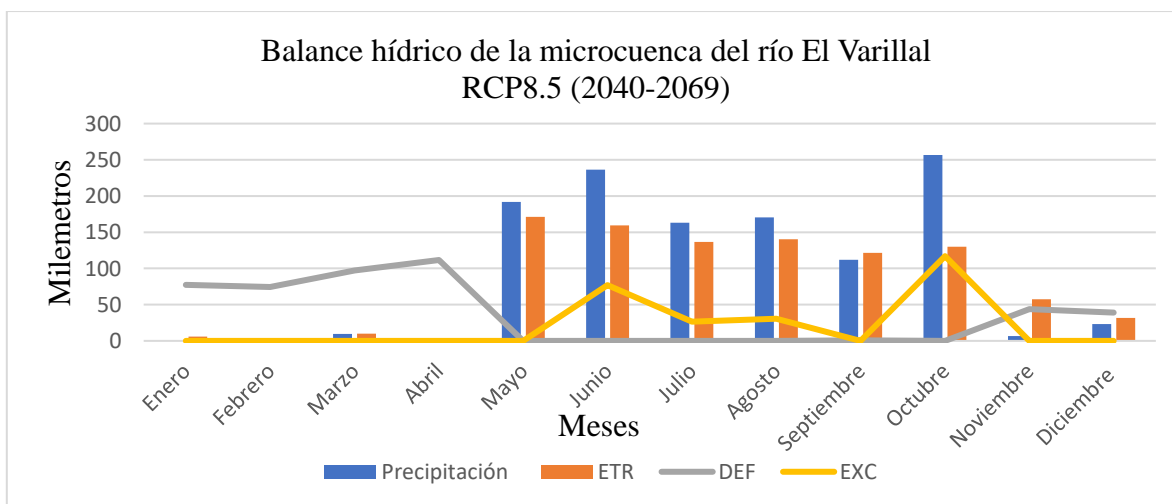


Figura 25. Balance hídrico de la microcuenca el Varillal bajo el escenario (RCP8.5)

Se observa para los meses secos, precipitaciones son mínimas desde 0.37 mm en enero y máximo de 23.4 mm en el mes de diciembre. En los meses de mayo a octubre las precipitaciones son más abundantes, los rangos de precipitación se presentan desde 111.8 mm (mínima) y 256.4mm (máxima), observándose la precipitación mínima en septiembre.

La evapotranspiración real (ETR) alcanza los valores máximos en los meses de mayo (171.23 mm) y junio (159.54 mm) debido al aumento de las temperaturas. Los valores mínimos se presentan en los meses de febrero 1.73 mm y abril 3.7 mm.

Se observa en el balance un exceso anual de 250.6 mm, siendo los meses con mayores excesos octubre (116.9 mm) y junio (76.79 mm) y un déficit hídrico que se presenta en el periodo seco, alcanzando su máximo valor en abril (111.6.98 mm).

Comparación de los escenarios climáticos

En la Figura 26, se muestra la comparación del balance hídrico histórico con el futuro, donde se presentan las principales variables del balance.

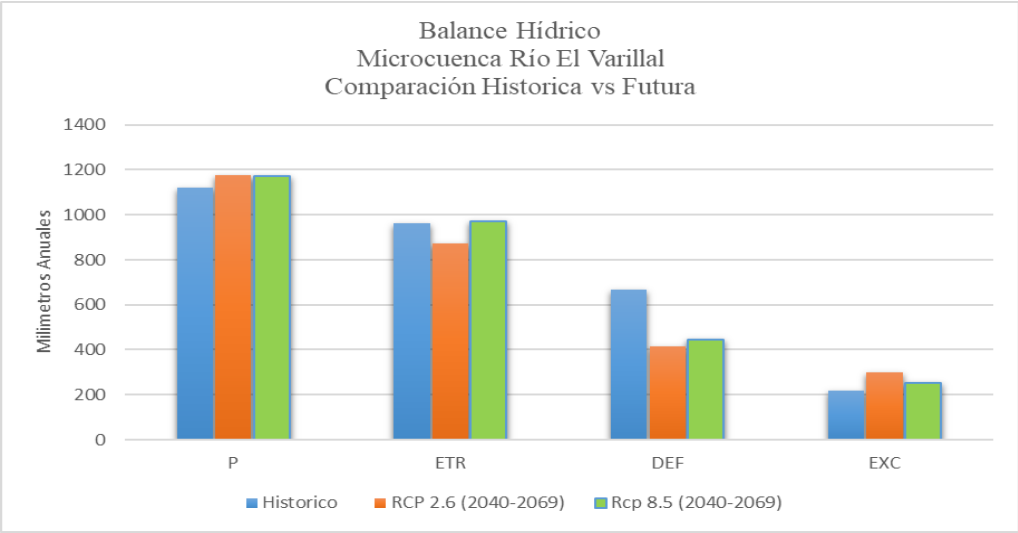


Figura 26. Comparación de escenarios climáticos

Los años hidrológicos estudiados, muestran aumento de las precipitaciones media anual en comparación con los registros históricos. Según el reporte de la CEPAL (2012) “los modelos proyectan un aumento de la frecuencia de los ciclones tropicales categoría 4 y 5 para finales del siglo”.

Para el escenario histórico los comportamientos de las precipitaciones están por debajo de los RCP; sin embargo, se observa que estas variaciones no están bien distribuidas, puesto que, en ambos escenarios futuros hay un desplazamiento de los acumulados de precipitación entre los meses agosto y septiembre, en el escenario histórico se tiene bien marcada en el periodo julio y agosto. Este cambio presenta un riesgo para los cultivos, lo que también pondría en riesgo la estabilidad de las obras de cosecha de agua, puesto que las lluvias tienden a aumentar y caer en periodos muy cortos.

Al comparar los tres escenarios climáticos se tiene como resultado los siguiente, aumento considerable en las precipitaciones para los RCP, aumento en la evapotranspiración potencial para el RCP 8.5 en relación con los otros dos, esto podría deberse a mayores temperaturas y más radiación solar. Tapasco, et al. (2015) afirman que, “Aunque la temperatura se incrementa, la precipitación también aumenta, lo que conlleva a que la mayor demanda evapotranspirativa sea compensada por los incrementos en la lluvia”.

Los déficits en los escenarios futuros no presentan una variación significativa para el RCP 2.6 (416.6 mm) y 8.5 (443.9 mm); sin embargo, en el histórico son mayor (666.2 mm) en comparación a los RCP, la reducción del déficit se debe al aumento de las precipitaciones.

Según Espinoza (2017) los aumentos de las precipitaciones se deban al comportamiento de las temperaturas; sin embargo, este incremento no garantiza que las precipitaciones sean uniformes dentro de la microcuenca. Las cosechas de agua establecidas podrían verse afectadas debido al exceso e intensidad de las precipitaciones concentradas en un solo momento, ya que estas podrían sobrepasar el límite de almacenamiento y consigo afectaciones a los taludes debido a la poca vegetación circundante.

5.2. Comportamiento de los caudales

A continuación, se presentan los caudales monitoreados durante agosto 2021 a abril 2022 y los caudales simulados bajo los escenarios climático actual y futuros.

5.2.1. Escenario histórico y actuales

La figura 27 muestra el hidrograma de los caudales medios anuales del punto de la desembocadura del río El Varillal (punto de monitoreo 8).

Se observa que los años cuyo caudal están por debajo del primer tercil (T1) (menores a $2.59 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) presentan incidencia de leve a fuerte del fenómeno El Niño, y los que están sobre el segundo tercil (mayores a $3.91 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) corresponde a años con incidencia del fenómeno de La Niña.

Acorde al Centro de Predicción climática del Servicio Nacional del Clima de los Estados Unidos, el año en el que se presentó mayor anomalía en la región El Niño 3.4 con respecto a la temperatura superficial del mar fue el 2015, presentándose un fenómeno muy fuerte del fenómeno de El Niño.

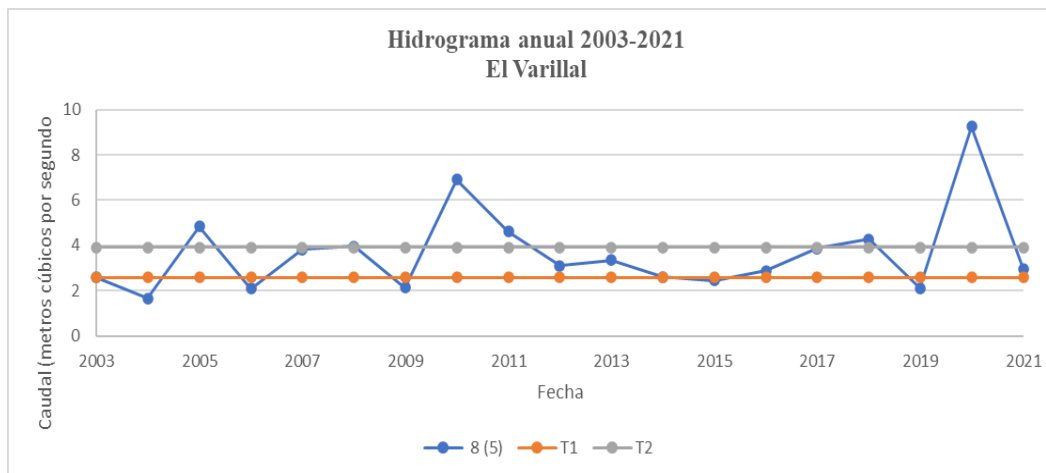


Figura 27. Hidrograma Anual 2003-2021 El Varillal.

Los años 2005, 2010, 2018 y 2020 que se encuentran con valores por encima del segundo tercil (T2), fueron años que presentaron diversos huracanes y tormentas tropicales en el país. En el 2005 se observa un pico por encima de los niveles máximos de caudales ya que se presentaron dos huracanes (Adrián y Beta), los cuales generaron pérdidas significativas en la agricultura. Para el año 2010 en el territorio se presentó la tormenta Matthew que generó lluvias dispersas. En el año 2020, el huracán ETA entró como categoría 4 generando fuertes precipitaciones en toda Nicaragua, y pocos días después el huracán IOTA con categoría 5 estos dos eventos climáticos elevo el caudal medio hasta los $9.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

En el cuadro 17, se presentan los caudales monitoreados en el periodo de agosto de 2021 a abril de 2022. En donde de los ocho puntos de muestreo solamente dos tenían caudal, según Webster y Markley (2001), en los ríos del departamento de Madriz el agua superficial está disponible de moderada a grandes cantidades en los periodos lluviosos y en muy pequeñas a pequeñas cantidades en la estación seca.

Durante las visitas a campo se logró observar el poco a nulo flujo superficial, tomando datos del punto seis que se ubica en la parte media-baja y punto ocho en donde se encuentra desembocadura del cuerpo de agua, cabe recalcar que estos caudales son tomados en un momento específico.

Cuadro 17. Caudales medidos en la microcuenca del río El Varillal.

Punto	Caudal ($m^3 s^{-1}$)								
	2021				2022				
	26/08	14/10	25/11	03/12	26/01	31/01	10/03	29/03	20/04
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0011	0.0053	-	0.0034	0.0057	0.0063	0.0144	0.0136	0.0015
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0006	0.0009	0.0025	0.0005	0.0015	0.0016	0.0012	0.0052	0.0021

Acorde al Centro de Predicción Climática del Servicio Nacional del Clima de los Estados Unidos, para el año 2021 se presentó el fenómeno de La Niña moderado. En la figura 28 se reflejan los registros de caudales, en donde de enero a junio se presentan valores mínimos de $0.01 m^3 s^{-1}$, pero en el mes de abril se observa una anomalía en el caudal del periodo seco. Sin embargo, esta no marca la entrada del invierno, ya que se puede visualizar una entrada tardía en el periodo lluvioso, en donde el valor máximo es de $2.80 m^3 s^{-1}$ en el mes de julio indicando, seguido de lluvias más constantes en los siguientes meses.

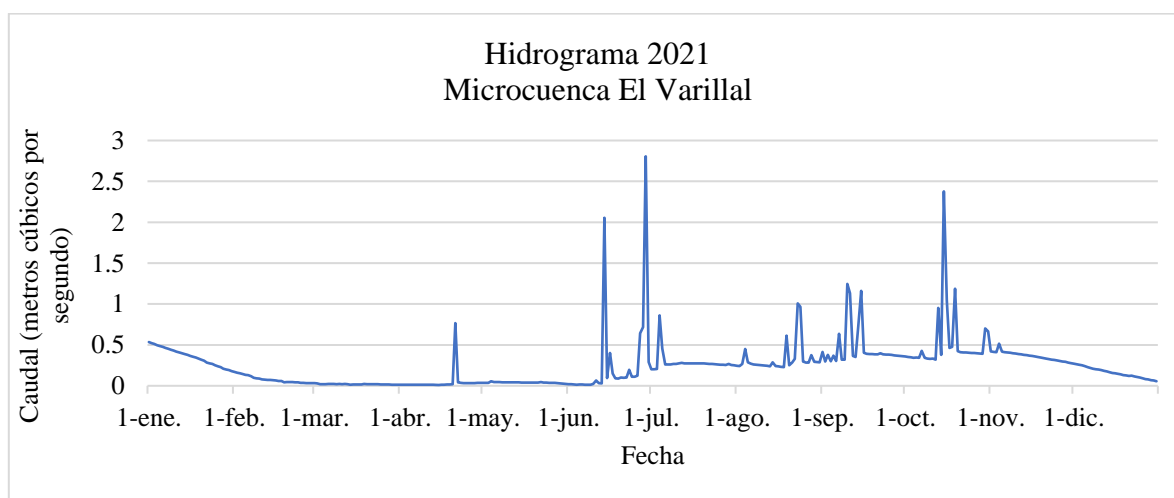


Figura 28. Hidrograma 2021 de la microcuenca del río El Varillal.

5.2.2. Escenario futuro

La figura 29 presenta el hidrograma de caudales futuros simulados bajo los escenarios climáticos RCP 2.6 y RCP 8.5. El comportamiento de caudal bajo el escenario RCP 2.6 en un período de tiempo de 30 años, presenta registros que no varían significativamente entre los años del 2043 al 2065 que sus valores se encuentran entre $0.45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Para el 2065 se estima el aumento de los caudales ($0.49 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), esto podría estar relacionado a un aumento de las precipitaciones proyectadas bajo este escenario.

Para el escenario RCP 8.5 las condiciones son más variables en el comportamiento de los caudales, a partir del año 2043 hasta 2051 los caudales son similares que el escenario anterior ($0.48 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), sin embargo, presentan una ligera disminución del caudal posterior al año 2047. Desde el año 2052 hasta 2056 el nivel de caudales estará por encima de los $0.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ estos registros altos podrían estar relacionado a huracanes o tormentas tropicales, generando así precipitaciones intensas en cortos o prolongados periodos de tiempo. En los años siguientes se esperan periodos secos en donde los caudales disminuyen significativamente hasta los $0.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y dependiendo de las condiciones climáticas.

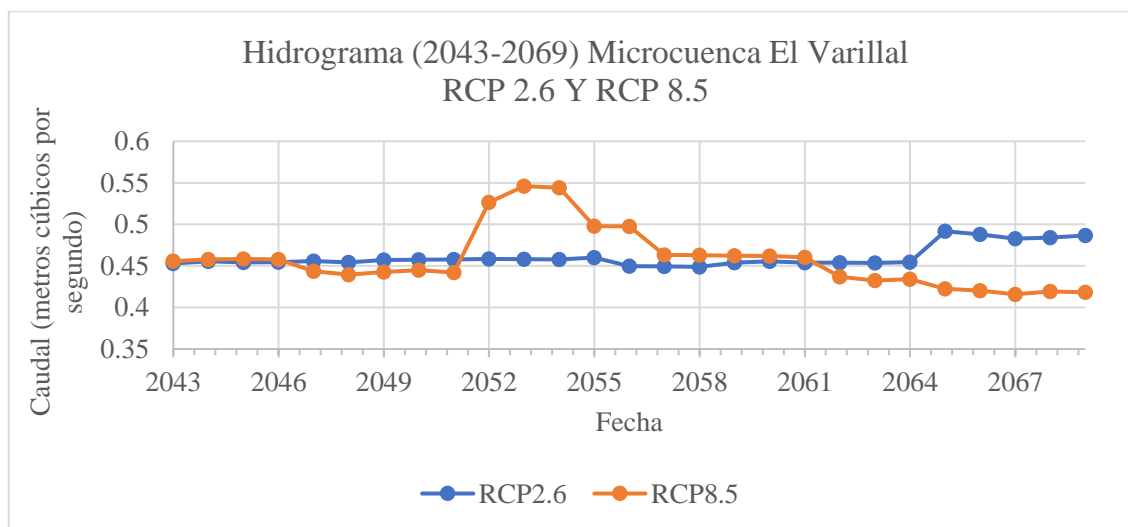


Figura 29. Hidrograma del periodo 2043- 2069 de la microcuenca del río El Varillal, bajo los escenarios climáticos RCP 2.6 Y 8.5

El V informe del IPCC (2015) indica que:

En el marco del escenario RCP8.5, es probable que para final de este siglo los eventos climáticos sean más intensos y frecuentes en la mayoría de las masas térricas de latitud media y en las regiones tropicales, conforme vaya aumentando la temperatura media global en la superficie.

5.3. Influencia de las unidades de respuesta hidrológicas sobre el escurrimiento superficial

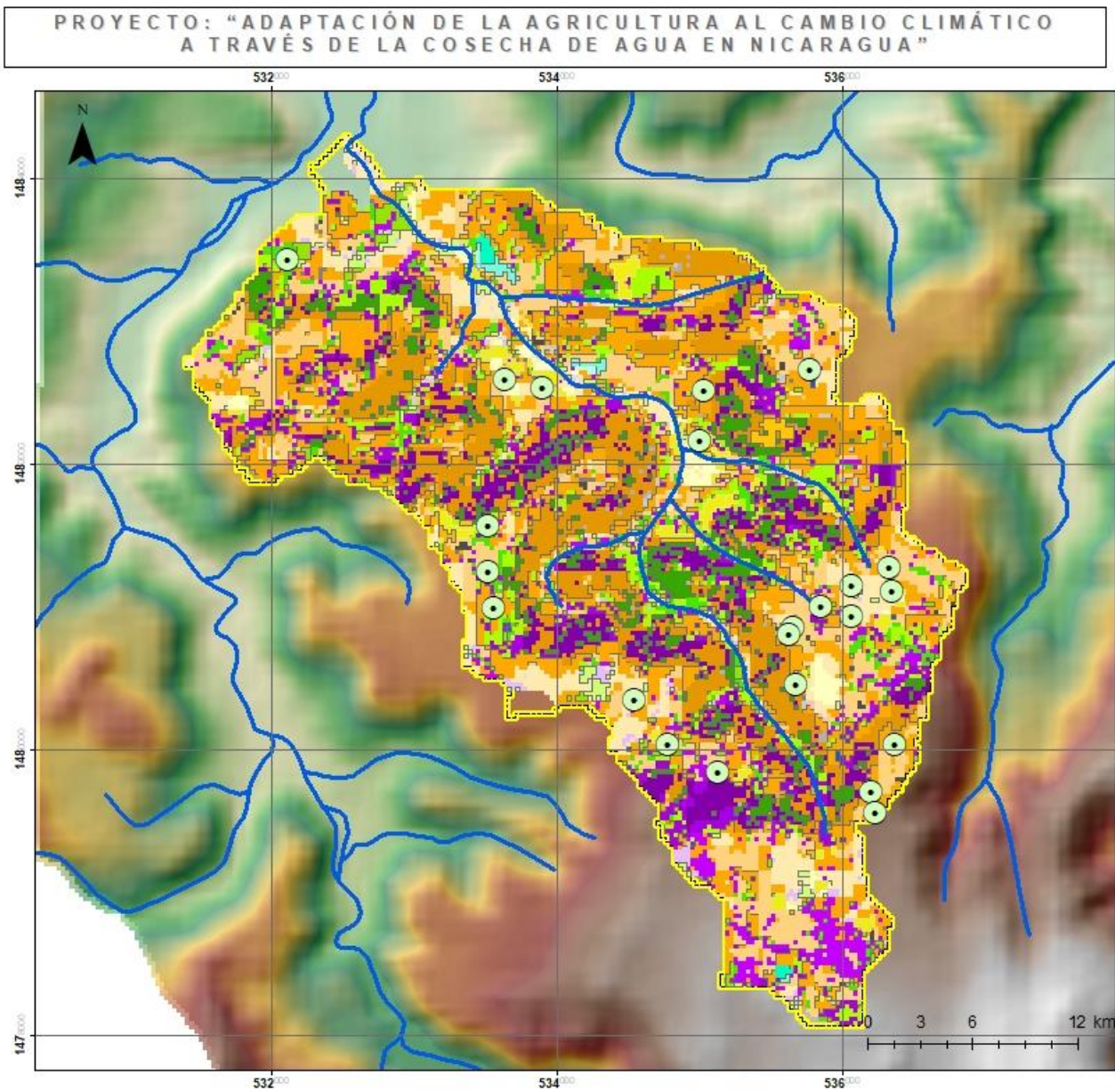
La microcuenca del río El Varillal presenta 137 unidades de respuesta hidrológica (URH) (figura 30), de las cuales destacan URH con usos pecuarios, como áreas de potreros y pasturas, en ocasiones con árboles dispersos; en pendientes inclinadas a escarpadas (mayores al 8%); en suelos Lithic Ustorthents.



Las URH que mayor aporte generan en el escurrimiento superficial presentan combinaciones de usos de cultivos anuales o superficies desprovistas de vegetación, en suelos del subgrupo Lithic Ustorthents. y Typic Haplusterts; y en pendientes moderadamente escarpadas a fuertemente escarpadas (mayores al 15%).

El área en estudio actualmente está cubierta por pastizales, pequeñas extensiones de cultivos anuales y extensiones de bosque localizado en la parte alta. El uso que más predomina es el pastizal con un 59.01 % el cual favorece la escorrentía, la producción de sedimentos y el traslado de las partículas de suelo desde la parte alta a la baja de la microcuenca.

Cuadro 18. Escurrimiento superficial en milímetros por subunidad, de la microcuenca del río El Varillal

Subunidad	Área (km ²)	Escurrimiento superficial (mm)		
		Histórico	RCP 2.6	RCP 8.5
1	6.66	188.11	373.93	388.59
2	1.97	173.53	348.78	368.13
3	2.55	171.66	347.76	360.51
4	1.29	147.38	310.62	326.70
5	3.72	173.38	353.42	363.65
Promedio	16.20	177.11	356.98	371.00



Proyección del escurrimiento superficial bajo distintos escenarios climáticos en la microcuenca del río El Varillal, San Lucas, Madriz


Unidades de Respuesta Hidrológica

Simología

- Obra de Cosecha de Agua
- Microcuenca
- Red hidrica

Usos del suelo, pendiente

AGRR, 0-4.0	FRST, 4.0-8.0	PAST, 8.0-15.0
AGRR, 4.0-8.0	FRST, 8.0-15.0	PAST, 15.0-30.0
AGRR, 8.0-15.0	FRST, 15.0-30.0	PAST, >30.0
AGRR, 15.0-30.0	FRSD, 0-4.0	RNGB, 0-4.0
BARR, 0-4.0	FRSD, 4.0-8.0	RNGB, 4.0-8.0
BARR, 4.0-8.0	FRSD, 8.0-15.0	RNGB, 8.0-15.0
BARR, 8.0-15.0	FRSD, 15.0-30.0	RNGB, 15.0-30.0
BARR, 15.0-30.0	FRSD, >30.0	RNGB, >30.0
BARR, >30.0	PAST, 0-4.0	WATR, 0-4.0
FRST, 0-4.0	PAST, 4.0-8.0	



Fuente de información:
Escala: 1:36,928
Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM Zone 16N
Proyección: Transversal de Mercator
Datum: Horizontal, WGS 1984
Unidades: Metros


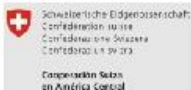



Figura 30. Unidades de Respuesta hidrológica presentes en la microcuenca del río El Varillal

En el Cuadro 18 se detalla el escurrimiento medio de cada subunidad según los registros históricos y los escenarios climáticos RCP 2.6 y RCP 8.5. Lozano-Trejo et. al (2020), indican que existe un asocio negativo entre el escurrimiento y el contenido de limo en el suelo, es decir, a mayor contenido de limo, menor escurrimiento. Los suelos de la microcuenca del río El Varillal presentan un contenido mayor de arcilla que de limo y arena (texturas franco-arcillosas a arcillosas), lo que explica el comportamiento del escurrimiento superficial, destacando la subunidad 1 por presentar el mayor aporte (188.11 mm) con el escenario histórico.

El aporte de la subunidad 1 se debe a las características de sus suelos, que corresponde a Vertic Ustorthents en pendientes moderadamente escarpadas y Typic Haplusterts, en pendientes ligeramente inclinadas, en conjugación con los usos pecuarios que propician la compactación del suelo, y por ende el escurrimiento superficial.

La subunidad de la microcuenca que genera menor aporte en el escurrimiento superficial con el escenario histórico es la subunidad 4 con 147.38 mm, dominada por unidades de respuestas hidrológicas predominantes corresponden a las superficies de pastos en suelos Lithic Ustorthents en pendientes moderadamente escarpadas; así como pasturas en suelos en pendientes planas a ligeramente inclinadas.

El escurrimiento total de la microcuenca bajo los RCP2.6 y RCP8.5 reflejan un incremento medio del escurrimiento con respecto al escurrimiento histórico, de 101.56 % y 109.48 % respectivamente. Siendo la subunidad 4, la que presenta el mayor incremento en términos de milímetros escurridos de 110.77% y 121.67%, para el RCP2.6 y RCP8.5 respectivamente.

Estos cambios de escurrimiento en estos escenarios podrían ser productos de condiciones climáticas más favorables, en donde es probable que haya más estabilidad en el ciclo hidrológico o bien podrían ser por condiciones menos estables debido a cambios de usos de suelos y eventos lluviosos más intensos en cortos periodos de tiempo.

Según FUNIDES (2017):

El comportamiento del escenario RCP 2.6 se observa poco o ningún cambio anual en la acumulación de las precipitaciones. Sin embargo, el RCP 8.5 muestra condiciones significativamente más secas en la década del 2030 en el corredor seco del centro norte de Nicaragua y un clima más seco en todo el país.

En el Cuadro 19 y en la figura 31 se presentan los resultados de 23 obras de cosecha de agua establecidas dentro de la microcuenca, y las unidades de respuesta hidrológica (URH) correspondiente.

Cuadro 19. Aporte de las subunidades de respuesta hidrológicas en las obras de cosecha de agua establecidas en la microcuenca del río El Varillal

Código	Ecurrimiento superficial (mm)			Sub-unidad	Unidad de Respuesta Hidrológica (URH)		
	Histórico	RCP 2.6	RCP 8.5		Uso	Suelo	Pendiente
561	216.34	420.72	413.37	5	Bosque deciduo	Typic haplusterts	4-8%
1426	309.59	548.46	464.97	1	Agricultura	Typic haplusterts	4-8%
1427	227.02	434.12	453.37	1	Pastizal	Typic haplusterts	15-30%
1430	228.31	434.56	454.5	2	Pastizal	Typic haplusterts	0-4%
1468	227.02	432.12	453.37	1	Pastizal	Typic haplusterts	15-30%
1471	228.45	435.1	454.86	1	Pastizal	Typic haplusterts	4-8%
1472	228.31	434.56	454.5	2	Pastizal	Typic haplusterts	0-4%
1474	228.31	434.56	454.5	2	Pastizal	Typic haplusterts	0-4%
1488	228.45	435.1	454.86	1	Pastizal	Typic haplusterts	4-8%
1506	228.51	435.43	455.05	1	Pastizal	Typic haplusterts	8-15%
1520	228.51	435.43	455.05	1	Pastizal	Typic haplusterts	8-15%
1521	228.51	435.27	454.93	2	Pastizal	Typic haplusterts	4-8%
2115	102.99	256.96	266.48	3	Agricultura	Lithic ustorthents	8-15%
2118	227.35	432.02	447.92	1	Pastizal	Vertic ustorthents	15-30%
2119	228.9	433.02	449.46	1	Pastizal	Vertic ustorthents	0-4%
2126	227.35	432.02	447.92	1	Pastizal	Vertic ustorthents	15-30%
2170	143.03	300.93	323.65	4	Pastizal	Lithic ustorthents	4-8%
2172	143.19	301.2	323.16	3	Pastizal	Lithic ustorthents	15-30%
3079	328.09	580.45	588.74	3	Agricultura	Typic haplusterts	8-15%
3686	228.51	435.43	455.05	1	Pastizal	Typic haplusterts	8-15%
3697	227.02	432.12	453.37	1	Pastizal	Typic haplusterts	15-30%
3742	153.52	321.29	336.99	3	Pastizal	Lithic ustorthents	0-4%
3743	241.32	461.64	471.33	3	Pastizal	Typic haplusterts	0-4%

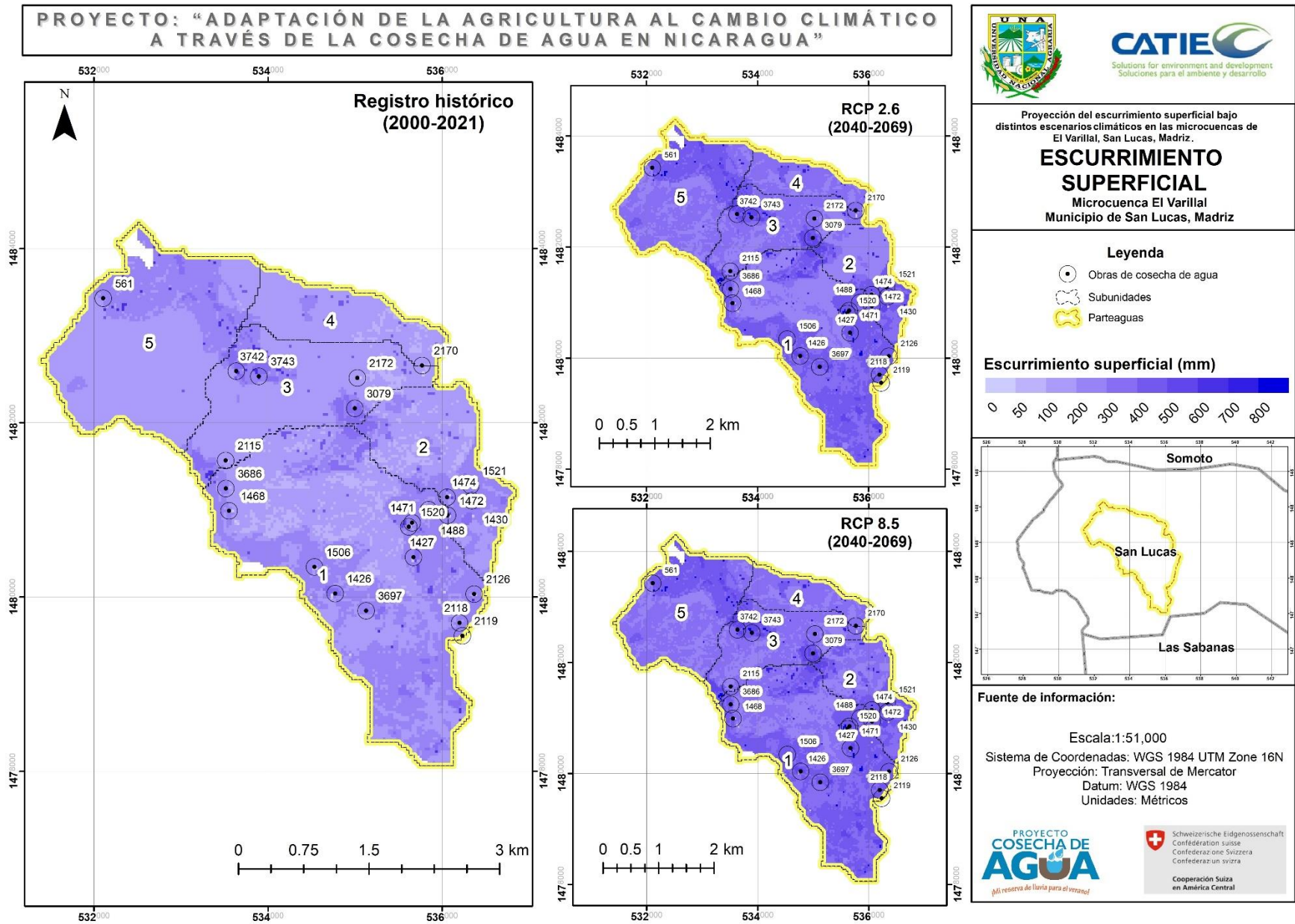


Figura 31. Comportamiento del escurrimiento superficial en la microcuenca del río El Varillal

Destaca el aporte de las URH con Agricultura, en suelos profundos con alto contenido de arcilla expansible en todo el perfil (Typic Haplusterts) en pendientes moderadamente inclinadas a (8-15%), en la obra de cosecha de agua con código 3079, establecida en la subunidad 3; y la URH con Agricultura, en suelos Typic Haplusterts, en pendientes ligeramente inclinadas (4-8%), en la obra de cosecha de agua con código 1426, en la subunidad 1. Notter *et al.*, (2007) sugiere que la conversión de las superficies forestales a cultivo o pastizales incrementa la escorrentía superficial anual provocando inundaciones y disminución de los caudales.

Se logró observar que los mayores aportes del escurrimiento están presentes en suelos Typic Haplusterts por ser de características arcillosas, sumado a esto su uso actual es la agricultura, bosque latifoliado y pastizales, áreas con el relieve moderadamente escarpada a fuerte escarpada, lo que facilita el flujo del escurrimiento de agua superficial hacia las Obras de Cosechas de Agua distribuidas en las cinco subunidades.

Según Senisterra (2014):

Los usos de suelo agrícola y pastizales generan mayores escurrimientos superficiales, además de otros problemas asociados como ser la contaminación de las aguas por el uso de plaguicidas y el uso de labranza de suelo tradicional, que aumenta el riesgo de pérdida de suelo.

Los suelos Lithic Ustorthents, con pendientes de ligeras a escarpadas, uso actual de pastos y textura arcillosa, son los que generan el menor aporte del escurrimiento superficial en comparación con los suelos Typic Hapluster y Vertic Ustorthents,

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 vegetación forestal. Sin embargo, en ambos escenarios futuros se puede inferir que los usos agropecuarios en conjugación las características físicas del suelo y las condiciones futuras desfavorables previstas bajo los escenarios climáticos podrían comprometer la estructura de las obras si no se le brinda un mantenimiento periódico.

VI. CONCLUSIONES

Los suelos presentes en la microcuenca del río El Varillal, son pocos profundos y arcillosos de orden entisol y profundos y arcillosos con orden vertisol. Las características morfométricas indican que no es propensa a inundaciones, el desplazamiento del agua en la red de drenaje es lento; sin embargo, sus características de forma alargada y relieve inclinado indican que se encuentra en equilibrio, pero con tendencia a sedimentaria. Las características de su red de drenaje reflejan que podría estar propensa a inundaciones en un futuro; habiendo otros factores que favorezcan esta condición como los cambios de usos de suelo a pastizales, suelo erosionados, arcillosos y pendientes accidentadas.

Los eventos climáticos serán diversos y dinámicos, en donde las variables climáticas de los escenarios futuros superan los valores históricos, esto es notorio en los valores de los hidrogramas y balances hídricos, en donde las precipitaciones y caudales aumentan en un periodo de 30 años proyectados.

Los aportes de escurrimiento superficial de las Unidades de Respuesta Hidrológica en la microcuenca varían de acuerdo con cada escenario, incrementando en los escenarios futuros. Estos incrementos estarán asociados a eventos climáticos de mayor intensidad, lo que se convertiría en precipitaciones irregulares con menor duración. Las URH que presentan pasto, suelos Typic Haplusterts y pendientes accidentadas son las que generan el mayor aporte de escurrimiento superficial, esto podría llevar a las obras a sobrepasar su capacidad.

VII. RECOMENDACIONES

Brindar mantenimiento a la infraestructura de las Obras de Cosecha de Agua colocando vegetación circundante, ya que algunas presentan desgastes en los taludes debido al escurrimiento superficial, llevando a la estructura a una inestabilidad y disminución en su utilidad.

Preparar a las comunidades ante eventualidades climáticas, promoviendo la conservación y conciencia ambiental, esto debido a que los cambios en el clima serán inciertos, pero debe haber resiliencia ante ellos.

Promover buenas prácticas de conservación de suelo y agua, donde se implemente la rotación de cultivos, sistemas Agroforestales y conservación de bosques en la potencial de recarga hídrica.

VIII. LITERATURA CITADA

- Alianza por la Resiliencia. (2014). *Plan de manejo y gestión integral de la subcuenca del río Tapacalí, Madriz, Nicaragua*. Obtenido de https://preparecenter.org/sites/default/files/plan_de_manejo_tapacali_22022_015.pdf
- Arnold, J., Kiniry, J., Srinivasan, R., Williams, J., Haney, E., & Neitsch, S. (2012). *Soil & Water Assessment Tool: Input/Output Documentation*. Texas: Texas Water Resources Institute. Recuperado de
- Blandón, L.C. (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*. Recuperado de: <https://repositorio.unan.edu.ni/10879/1/0707.pdf>
- Caballero Arbizu, Y. S. y Villalobos, S. (2018). *Origen de suelos depositados en la subcuenca del río Tapacalí, Madriz Nicaragua mediante el uso de la técnica de isótopos estables de compuestos específicos*. Obtenido de <https://www.aqua-lac.org/index.php/Aqua-LAC/article/view/190.pdf>
- Comisión económica para América Latina y El Caribe (2012). *Efectos del cambio climático en las costas de América Latina y el Caribe. Publicación de las Naciones Unidas. Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile*.
- Córdoba, M. (2016). *Parámetros geomorfológicos en cuencas hidrográficas*. Obtenido de: https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos; Servicio de Conservación de Recursos Naturales. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos*. Décima segunda edición
- 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. Obtenido de <https://repositorio.una.edu.ni/3587/1/tnp40e77i.pdf>

- Fenández, R. (2017). *Utilización del programa "SWAT" para la estimación de la emisión de sedimentos en cuencas*. Huelva, España: Universidad de Huelva. Obtenido de http://www5.uva.es/trim/TRIM/TRIM12_files/RFernandez.pdf
- Gámez, W. (2010). *Texto básico de Hidrología*. Recuperado de: <https://repositorio.una.edu.ni/2464/1/np10g192.pdf>
- Gaspari, F., Senisterra, G., & Marlats, R. (2007). *Relación precipitación - escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo*. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/3828/382837653003.pdf>
- Gómez, G.C., Munive Cerrón, R., Mallma Capcha, T. & Orihuela Villavicencio, C. (2014). *Evaluación de la tasa de infiltración en tierras agrícolas, forestales y de pastoreo en la subcuenca del río Shullcas*. 4 (1), 32-42. Obtenido de: <https://doi.org/10.18259/acs.2014004>
- Gourdjia, S; Läderachb, P; Martínez, A; Zelaya, C; Lobell, D. 2015. *Historical climate trends, deforestation, and maize and bean yields in Nicaragua* Sharon Gourdji. s.l., s.e., vol.200. 270-281 p.
- Hernández.M.(2022). *Estimación de carga de sedimentos por erosión hídrica mediante el uso del modelo SWAT en la microcuenca del río La Carreta, San Juan de Cinco Pinos, Chinandega*. (Tesis de ingeniería). Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua. Obtenido de: <https://repositorio.una.edu.ni/4477/1/tnp36h557e.pdf>
- Horton, R.E. (1945). *Erosional development of streams and Their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*. <https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf>
- Hudson, N. W. (1997). Capítulo 4-Caudal. Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la escorrentía.
- Informe, I. P. C. C. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. *Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.

- IPCC, 2013. “Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Recuperado de : https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1_AR5_SPM_ES.pdf
- Leupolz-Rist., R.A., Cantarero., S, I., Toruño., C,A. García, A.,. (2017). *Cambio climático en el sector ganadero de Nicaragua del riego climático a la adaptación basada en ecosistemas*. Obtenido de: <https://funides.com/wp-content/uploads/2017/04/cambio-climatico-sector-ganadero-nicaragua-abril-2017.pdf>
- Lozano-Trejo, S., J. Olazo-Aquino, M. I. Pérez-León, E. Castañeda-Hidalgo, G. O. Díaz-Zorrilla y G. M. Santiago-Martínez. (2020). *Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México*.
- Martínez Ruiz, R., Azpiroz Rivero, H., Rodríguez De la O J., Celtina Alcalá, V., y Gutiérrez Espinoza, M. (2006). *Importancia de las plantaciones forestales de Eucalyptus*. Revista Ra Ximhai. 2 (3), 815-846. obtenido de: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rxm/article/view/6903>
- Mendoza, R. (2014). *Guía para el uso de indicadores de calidad de suelo*. Universidad Nacional Agraria, Managua (Nicaragua); CIAT, Managua (Nicaragua). Obtenido de: <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/REN35M539.pdf>
- Notter, B., MacMillan, L., Viviroli, D., Weingartner, R., & Liniger, H. P. (2007). *Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region*. *Journal of Hydrology*, 343(3-4),266-278.
- REDD/CCAD-GIZ. (2014). *Metodología para el levantamiento de puntos de control en la verificación del mapa de superficie forestal y cobertura de la tierra de Honduras*. Obtenido de https://www.sica.int/documentos/nota-tecnica-metodologia-levantamiento-puntos-de-control-mapa-hn_1_124862.html

- Ribalaygua, J., de Loma-Ossorio, E., Córdoba, M., Torres, L., Lahoz, C., Arias, Á., y Caicedo, A. (2011). *Enfoques innovadores en la simulación del cambio climático y su impacto en la seguridad alimentaria*. La experiencia de Nicaragua. Managua: Universidad Centroamericana.
- Romero, K. (2020). *Estimación del potencial hídrico en las microcuencas de Jalapa, La Tablazón, Inalí y Guayucali ubicadas en las Segovias, 2018-2019*. . (Tesis de ingeniería). Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua.
<https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/4216>
- Senisterra, G.E. (2014). *Influencia del cambio de uso del suelo sobre el escurrimiento superficial*. Obtenido de:
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/42165/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Shukla, P. R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H. O., Roberts, D. C., ... & Malley, J. (2019). IPCC, 2019: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*.
- Universidad Nacional Agraria (UNA) & Catholic Relief Services (CRS). (2017). *Guía Técnica para Muestreo de Suelos*. Obtenido de
<https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Webster, T.C y Markley, B (2001). *Evaluación de los recursos agua en Nicaragua*. Obtenido de:
<https://www.sam.usace.army.mil/Portals/46/docs/military/engineering/docs/WRA/Nicaragua/WRA%20SPANISH.pdf>

IX. ANEXOS

Anexo 1. Balances hídrico de la microcuenca del río El Varillal (escenario histórico)

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Precipitación	0.72	1.81	10.62	26.65	201.21	215.55	82.68	100.26	206.07	226.08	40.00	9.87	1121.52
ETP	102.66	116.92	152.21	191.35	193.97	126.08	140.72	151.90	131.06	116.25	103.01	104.18	1630.32
P-ETP	-101.94	-115.11	-141.59	-164.70	7.24	89.47	-58.04	-51.64	75.01	109.83	-63.02	-94.30	
PPA	-259.26	-374.38	-515.97	-680.67	0.00	0.00	-58.04	-109.68	0.00	0.00	-63.02	-157.32	CRAD
RES	1.63	0.31	0.04	0.00	69.16	69.16	29.88	14.16	69.16	69.16	27.81	7.11	69.16
VR	-5.48	-1.32	-0.27	-0.04	69.16	0.00	-39.28	-15.72	55.00	0.00	-41.35	-20.69	
ETR	6.20	3.13	10.88	26.69	193.97	126.08	121.96	115.98	131.06	116.25	81.35	30.57	964.13
DEF	96.46	113.79	141.33	164.66	0.00	0.00	18.76	35.92	0.00	0.00	21.66	73.61	666.19
EXC	0.00	0.00	0.00	0.00	-61.91	89.47	0.00	0.00	20.01	109.83	0.00	0.00	157.39
DRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.74	0.00	0.00	10.00	59.91	0.00	0.00	

Anexo 2. Balance hídrico de la microcuenca del río El Varillal (escenario RCP 2.6)

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
precipitación	2.80	0.00	6.41	4.18	277.67	234.40	207.65	187.08	49.44	169.86	10.05	25.21	1174.74
ETP	78.89	70.81	98.18	105.85	155.55	143.51	121.73	126.23	111.81	120.22	94.58	64.78	1292.13
P-ETP	-76.09	-70.81	-91.78	-101.67	122.11	90.89	85.92	60.85	-62.37	49.64	-84.53	-39.57	
PPA	-200.19	-271.00	-362.78	-464.45	0.00	0.00	0.00	0.00	-62.37	0.00	-84.53	-124.10	CRAD
RES	3.83	1.37	0.36	0.08	69.16	69.16	69.16	69.16	28.07	69.16	20.37	11.50	69.16
VR	-7.67	-2.45	-1.01	-0.28	69.08	0.00	0.00	0.00	-41.09	41.09	-48.79	-8.88	
ETR	10.47	2.45	7.42	4.46	155.55	143.51	121.73	126.23	90.53	120.22	58.84	34.09	875.49
DEF	68.42	68.36	90.77	101.39	0.00	0.00	0.00	0.00	21.28	0.00	35.74	30.70	416.65
EXC	0.00	0.00	0.00	0.00	53.04	90.89	85.92	60.85	0.00	8.54	0.00	0.00	299.25
DRE	0.00	0.00	0.00	0.00	26.52	58.71	72.31	66.58	0.00	4.27	0.00	0.00	

Anexo 3. Balance hídrico de la microcuenca del río El Varillal (escenario RCP 8.5)

Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Precipitación	0.37	0.00	9.54	3.55	191.89	236.33	163.18	170.61	111.86	256.49	6.76	23.40	1173.98
ETP	83.85	75.95	107.34	115.39	171.24	159.54	136.78	140.18	122.09	130.00	102.24	71.17	1415.77
P-ETP	-83.48	-75.95	-97.80	-111.84	20.65	76.79	26.41	30.43	-10.23	126.48	-95.48	-47.77	
PPA	-226.73	-302.68	-400.48	-512.31	0.00	0.00	0.00	0.00	-10.23	0.00	-95.48	-143.25	CRAD
RES	2.61	0.87	0.21	0.04	69.16	69.16	69.16	69.16	59.65	69.16	17.39	8.72	69.16
VR	-6.11	-1.74	-0.66	-0.17	69.12	0.00	0.00	0.00	-9.51	9.51	-51.77	-8.67	
ETR	6.48	1.74	10.20	3.72	171.24	159.54	136.78	140.18	121.37	130.00	58.53	32.07	971.85
DEF	77.37	74.21	97.14	111.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72	0.00	43.71	39.09	443.92
EXC	0.00	0.00	0.00	0.00	-48.47	76.79	26.41	30.43	0.00	116.97	0.00	0.00	202.13
DRE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	38.40	32.40	31.42	0.00	58.49	0.00	0.00	

Anexo 8. Base de datos para suelo en SWAT

urban													
OBJECTID	IUNUM	URBNAME	URBFLNM	FIMP	FCIMP	CURBDEN	URBCOEF	DIRTMX	THALF	TNCONC	TPCONC	TNO3CONC	
usersoil													
OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	SSID	CMPPCT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	TEXTURE	SOL_Z1	
187	VT093	17	TEEL	NY0076	1	3	B	1828.8000488	0.5	0.5	SIL-VFSL-FSL		
188	VT094	1	KEARSARGE	NH0031	8	3	B	457.20001221	0.5	0.5	STV-SIL-SIL-UW		
189	VT094	4	CARDIGAN	NH0033	8	4	B	787.40002441	0.5	0.5	STV-SIL-SIL-SIL-		
190	VT094	8	DUTCHESS	VT0052	5	3	B	1651	0.5	0.5	SIL-SIL-CNV-FSL		
191	VT094	9	STISSING	MA0050	5	3	C	1524	0.5	0.5	STV-SIL-CN--SIL		
192	VT094	10	WARWICK	MA0059	5	3	A	1651	0.5	0.5	FSL-SY--FSL-LS		
193	VT094	17	BERNARDSTON	MA0010	3	3	C	1651	0.5	0.5	STV-SIL-CN--SIL		
194	VT095	2	SKERRY	NH0004	9	3	C	1651	0.5	0.5	STV-FSL-GR--FSI		
195	VT095	3	SUCCESS	NH0052	9	4	A	1651	0.5	0.5	STV-SL-LS-S-S		
196	VT095	10	PERU	NH0014	5	3	C	1651	0.5	0.5	STV-FSL-FSL-FSL		
197	VT095	14	WAUMBOK	NH0016	3	3	B	1651	0.5	0.5	STV-FSL-GRV-LF		
198	VT096	8	PILLSBURY	NH0038	5	3	C	1651	0.5	0.5	STV-L-FSL-FSL		
199	VT096	9	ROCK OUTCROF	DC0015	5	1	D	1524	0.5	0.5	UWB		
200	VT096	11	BECKET	NH0002	5	3	C	1651	0.5	0.5	STV-FSL-FSL-SL		
201	VTW	7	WATER	DC0038	3	1	D	25.399999619	0.5	0.5			
202	VTPIT	10	PITS	NY0029	4	4	A	1828.8000488	0.5	0.5	GR--LS-GRV-S-G		
203	NI	1	THERT	SN02	100	3	D	950	0.5	0.5	Vertisol		
204	NI	1	LUENT1	SN03	100	1	C	150	0.5	0.5	entisol		
205	NI	1	VUENT	SN06	100	1	D	710	0.5	0.5	entisol		
207	NI	1	LUENT2	SN09	100	2	C	590	0.5	0.5	entisol		
*	(Nuevo)												

Registro: 1 de 206 Sin filtro Buscar