



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO**

**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**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y la Escuela de Posgrado como
requisito para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTIAE EN

MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Nelson Edmundo Arriaga Pérez

Turrialba Costa Rica, 2021

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

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


FIRMANTES:



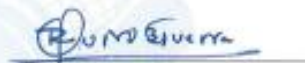
José Ney Ríos Ramírez, M.Sc.
Director de tesis



Jorge Faustino Manko, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Pedro Pablo Orozco Bucardo, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.
Decano, Escuela de Posgrado



Nelson Edmundo Arriaga Pérez
Candidato

Índice

1. ARTÍCULO CIENTÍFICO	vi
2. RESUMEN.....	vi
3. INTRODUCCIÓN	1
4. METODOLOGÍA	3
4.1. Ubicación y descripción del área de estudio	3
4.2. Zonas de vida presentes en la zona de estudio.....	3
4.3. Descripción del modelo hidrológico SWAT	4
4.3.1. Simulación hidrológica de la zona de estudio.....	6
4.3.2. Estimación de producción de sedimentos con el modelo SWAT	7
4.3.3. Configuración de datos de entrada para corrida del modelo hidrológico SWAT	8
4.3.4. Conjunto de datos de entrada del modelo hidrológico SWAT para el estudio	9
4.3.4.1. Modelo de elevación digital	10
4.3.4.2. Mapa de pendientes.....	11
4.3.4.3. Delimitación de la zona de estudio en la cuenca hidrográfica	12
4.3.4.5. Información climática	13
4.3.4.6. Usos y cobertura de suelos	16
4.3.4.7. Tipos de suelos	19
5. RESULTADOS y DISCUSIÓN.....	22
5.1. Simulación del Balance hidrológico de la zona de estudio	22
5.2. Erosión de suelo : niveles de erosión y su distribución espacial	24
5.3. Variables del balance hídrico para la zona de estudio según sus usos y coberturas	29
5.4. Distribución y cantidad de obras de cosecha de agua en la zona de estudio.....	32
5.5. Propuesta de lineamiento para mitigar posibles impactos de sedimentación por erosión de suelos.....	34
5.5.1. Protección y conservación al recurso suelo.....	34
5.5.2. Protección a las obras hidráulicas	35
6. Conclusiones	36
7. Recomendaciones.....	37
8. Referencias bibliográficas	38
9. Anexos.....	42

Índice de cuadros

Cuadro 1. Zonas de vida presentes en la zona de estudio	4
Cuadro 2. Datos de entrada al modelo hidrológico de evaluación de suelos y agua SWAT	9
Cuadro 3. Clasificación inicial de usos y coberturas predominantes en la zona de estudio	17
Cuadro 4. Agrupación de usos y coberturas con base a la clasificación inicial de INETER-2015	18
Cuadro 5. Tipos de suelos y sus características físico-químicas.....	21
Cuadro 6. Cálculos de los componentes del balance hidrológico, simulados por SWAT	24
Cuadro 7. Niveles de erosión para Nicaragua adaptados de criterios internacionales	25
Cuadro 8. Aporte de sedimentos de las subcuencas en SYLDt_ha y porcentajes	26
Cuadro 9. Porcentaje de contribución de SURQ_mm, por subcuenca.....	27
Cuadro 10. Niveles de erosión y distribución de área en la zona de estudio	29
Cuadro 11. Niveles de erosión por rangos de pendientes	29
Cuadro 12. Distribución de usos y coberturas y/o otras características de la zona de estudio	30
Cuadro 13. Distribución de obras por zonas	33

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de la subcuenca río Coco-Somoto-Madriz, Nicaragua.....	3
Figura 2. Zonas de vida presente en la zona de estudio	4
Figura 3. Unidades de respuesta hidrológica en la cuenca.....	5
Figura 4. 4a: Fase de terrestre del ciclo hidrológico. 4b: Fase de enrutamiento del ciclo hidrológico.....	6
Figura 5. Proceso de preparación de información, configuración y corrida del modelo SWAT ...	9
Figura 6. Modelo de elevación digital de la zona de estudio	11
Figura 7. Mapa de clases de pendientes en la zona de estudio.....	12
Figura 8. Proceso de delimitación de la subcuenca.....	12
Figura 9. Proceso metodológico para selección de las estaciones climáticas variables de interés y su procesamiento	14
Figura 10. Proceso metodológico de selección de estaciones meteorológicas y variables climática	15
Figura 11. Comportamiento de la variable de precipitación y temperatura en la estación meteorológica número 1, en la zona de estudio	16
Figura 12. Tipos de usos y coberturas en la zona de estudio-INETER 2015.....	17
Figura 13. Usos y coberturas de acuerdo con la nomenclatura de SWAT para la zona de estudio	19
Figura 14. Mapas de tipos de suelos presentes en la zona de estudio	20
Figura 15. Software SPAW-USDA, usado para determinar características físico-químicas de los suelos de la zona de estudio.....	21
Figura 16. Subcuencas delimitadas por SWAT.....	22

Figura 17. Representación esquemática del balance del ciclo hidrológico de la zona de estudio	23
Figura 18. a; Mapa de la dinámica de producción de sedimentos, b; subcuencas con mayor producción de sedimentos	26
Figura 20. Mapa de la dinámica de precipitación (mm) de las subcuencas	27
Figura 19. a; Mapa de la dinámica de SURQ_mm/Subcuencas b; contribución de SURQ_mm por subcuenca	27
Figura 21. A) Niveles de erosión en la zona de estudio, b) Distribución espacial de la erosión	28
Figura 22. a) Erosión por porcentaje de área según cobertura y uso b) Escorrentía superficial por usos y coberturas	31
Figura 23. Distribución de las obras por sección topográfica en la subcuenca río Coco-Somoto	32
Figura 24. Criterios de zonificación de cuencas (Faustino y Jiménez 2000)	33
Figura 26. Porcentaje de obras por usos y cobertura de suelo	34
Figura 25. a. Categorías de erosión sobre las obras de cosecha de agua Figura b. Obras por porcentaje de pendiente	34
Figura 27. Acciones propuestas para conservar suelo y evitar erosión	35
Figura 28. Acciones de protección de las obras de cosecha de agua	35

Listado de anexos

Anexo 1. Estadísticos climáticos calculados para cada estación climática	42
Anexo 2. Nomenclatura de SWAT, de usos y coberturas	43
Anexo 3. Clasificación de rangos de materia orgánica para Nicaragua-INETER	43
Anexo 4. Propiedades físico-químicas de las órdenes de suelo utilizadas para la zona de estudio	44
Anexo 5. Número de subcuencas elevaciones y distribución de área de superficie	45
Anexo 6. Comportamiento de la SURQ_mm de las subcuencas (9, 10, 11) con mayor aporte	45
Anexo 7. Comportamiento de precipitación de las subcuencas (9, 10, 11)	46

1. ARTÍCULO CIENTÍFICO

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

Nelson Arriaga Nelson¹ Ney Ríos² Pedro Orozo³ Jorge Faustino⁴

2. RESUMEN

En el presente estudio se realizó una modelación hidrológica con la herramienta para la evaluación de suelos y agua-SWAT, con el objetivo de evaluar el comportamiento de la erosión y sedimentos por escorrentía superficial en infraestructura de cosechadoras de agua tipo reservorio en la subcuenca río Coco Somoto en el corredor seco de Nicaragua. Para la simulación se utilizaron datos hidro-edafoclimáticos-espaciales de entrada al modelo: un modelo de elevación digital, información de clima, información de usos y coberturas, información de suelos. Todos los parámetros fueron construidos en los formatos requeridos por la interfaz de SWAT. El área delimitada por SWAT fue de 602.5 km², lo que representa un 69.75% del área total. La erosión media a nivel de la zona de interés en la subcuenca río Coco-Somoto es de 6 t ha⁻¹ año⁻¹, con niveles de erosión de suelo que van desde “Muy baja a Muy alta erosión” distribuidas espacialmente en las tres secciones topográficas de la subcuenca; parte (Alta, Media y Baja), estos niveles de erosión tienen lugar en zonas con diferentes rangos de pendientes, usos y coberturas y tipos de suelo. El 46.9% de la zona de estudio presenta niveles desde (Media-Alta a Muy alta) erosión y el 53.1% niveles de (Baja a Muy baja) erosión. Se encuentran 236 obras con capacidad de almacenamiento de 500 a 7,500 m³, distribuidas espacialmente en toda la zona de interés, del 100% de obras el 33% se encuentran en la parte alta 38% en la parte media y el 28% en la parte baja, un 6% se encuentra bajo el nivel de erosión de “alta a muy alta” en pendientes <25% y el 94% se encuentran en niveles de erosión de “muy baja a baja a media” en pendientes >25%. La cantidad de sedimentos que está llegando a cada obra es en promedio 0.14 Ton, el 18.6% de obras se ubican en zonas bajo usos de cultivos anuales, el 44.5% en zonas bajo pasturas, el 32.6% en zonas bajo vegetación arbustiva, el 3.4% en zonas de usos tacional y el 0.8% en zonas de uso bosque latifoliado. El uso con mayor aporte de sedimentos es cultivos permanentes, con un aporte del 39.6% mayor que los otros 9 usos, pero con un área menor del solo 0.95%. Los resultados reflejan que tanto el factor pendiente en combinación con el tipo de uso y/o cobertura y el manejo antropogénico determinan la dinámica espacial de producción de sedimentos. La identificación espacial de la producción de sedimentos, permitió realizar un análisis integral de las área bajo diferentes niveles de erosión, así mismo como identificar las obras según nivel de erosión con base a esto el proyecto cosecha de agua en conjunto con los productores podrán priorizar prácticas y tecnologías de conservación de suelos y agua que mitiguen el impacto de solvatación de las obras para que en el mediano y largo plazo la capacidad hidráulica de las cosechadoras de agua, no se vea afectada.

Palabras claves: Modelación hidrológica, cuencas hidrográficas, cosecha de agua.

ABSTRAC

In the present study, hydrological modeling was carried out with the soil and water assessment tool SWAT, with the objective of evaluating the behavior of erosion and sediment from surface runoff in reservoir-type water harvester infrastructure in the Coco Somoto river sub-basin in the dry corridor of Nicaragua. For the simulation, hydro-edaphoclimatic-spatial data were used as input to the model: a digital elevation model, climate information, land use and cover information, and soil information. All parameters were constructed in the formats required by the SWAT interface. The area delimited by SWAT was 602.5 km², which represents 69.75% of the total area. The average erosion at the level of the area of interest in the Coco-Somoto river sub-basin is 6 t ha⁻¹ yr⁻¹, with soil erosion levels ranging from "Very low to Very high erosion" spatially distributed in the three topographic sections of the sub-basin; part (High, Medium and Low), these erosion levels occur in areas with different ranges of slopes, uses and cover and soil types. 46.9% of the study area shows levels of (Medium-High to Very High) erosion and 53.1% shows levels of (Low to Very Low) erosion. There are 236 works with storage capacity from 500 to 7,500 m³, spatially distributed throughout the area of interest, of the 100% of works 33% are located in the upper part 38% in the middle part and 28% in the lower part, 6% are under the level of erosion of "high to very high" on slopes <25% and 94% are in erosion levels of "very low to low to medium" on slopes >25%. The amount of sediment reaching each site averages 0.14 tons, 18.6% of the sites are located in areas under annual crop use, 44.5% in areas under pasture, 32.6% in areas under shrub vegetation, 3.4% in areas of tacotal use and 0.8% in areas of broadleaf forest use. The use with the greatest contribution of sediment is permanent crops, with a contribution of 39.6% greater than the other 9 uses, but with a smaller area of only 0.95%. The results reflect that both the slope factor in combination with the type of use and/or cover and anthropogenic management determine the spatial dynamics of sediment production. The spatial identification of sediment production allowed for an integral analysis of the areas under different levels of erosion, as well as the identification of the works according to the level of erosion. Based on this, the water harvesting project, together with the producers, will be able to prioritize soil and water conservation practices and technologies that mitigate the impact of solvation of the works so that in the medium and long term the hydraulic capacity of the water harvesters is not affected.

Key words: Hydrologic modeling, watersheds, water harvesting.

3. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha extendido la utilización y aplicación de sistemas computacionales informáticos de georreferenciación y geo medición, para construir escenarios mediante modelaciones, que permitan conocer problemáticas de erosión de suelo en cuencas hidrográficas (IICA 2017). La conservación de suelo y la seguridad hídrica en las cuencas hidrográficas de Nicaragua, especialmente en la zona del corredor seco, es actualmente un reto ante el incremento, prolongación y distorsión en la distribución espacial de eventos adversos (sequías, lluvias intensas, incendios forestales) producto de la variabilidad y cambio climático y de actividades antropogénicas. La conservación de estos recursos no tiene un patrón estático y son variables en el tiempo y en el espacio e influenciados por la acción antropogénica (Faustino 1986) .

Ante este contexto, las cuencas como unidades hidrológicas demandan de un manejo y una gestión integral referente a lo social-técnico-científico-financiero y tecnológico, donde la modelación hidrológica constituya una herramienta fundamental para generar información de línea base. Así mismo, entender la dinámica de lo que está aconteciendo a diferente escala de cuenca (IDEAM 2018), en cuanto comportamiento de ciclo hidrológico, procesos de producción de erosión y sedimentos de suelos, escorrentía superficial y cambio climático en general y proponer soluciones.

La modelación hidrológica permite el empleo de diferentes métodos de modelos hidrológicos, como por ejemplo, los indirectos que son operativizados a través de sistemas computacionales y los directos que consisten en el establecimiento de unidades experimentales en *Si-Tu* ambos permiten cuantificar la pérdida de suelos y la acumulación de sedimentos en un punto específico de las cuencas (Ríos *et al.*, 2008).

Los modelos hidrológicos son una representación de un sistema real y complejo llamado prototipo, bajo una forma física y matemática, que a través de ordenadores permite crear los procesos físicos que dan lugar al ciclo hidrológico (Ríos *et al.* 2008); según (Farzana *et al.* 2019) estos modelos crean escenarios de impactos negativos en el manejo de los recursos naturales (suelo, agua, bosque) en las cuencas (Arnol *et al.* 2002, Ávalos *et al.* 2014) y en zonas semiáridas ayudan a realizar una caracterización hidrológica Castillo (Castillo y Marin 2011). Uno de estos modelos hidrológicos es (SWAT) que combinado con los sistemas de información geográfica (QGIS), mediante la integración de variables climáticas y geoespaciales en su interfaz (Vigiak *et al.* 2017) permite simular y estimar la producción de escorrentía y sedimentos (Rivera *et al.* 2012). Los resultados generados permiten identificar espacialmente las áreas de mayor susceptibilidad a procesos de erosión hídrica a nivel de cuencas, subcuencas, microcuencas y fincas. (Morales *et al* 2010).

Este modelo hidrológico ha sido aplicado bajo diferentes escalas y condiciones ambientales en cuencas de Centroamérica y el Caribe, para evaluar balances hídricos, producción de sedimentos, contaminación de agua, cambios de usos de suelo (Schuol *et al.* 2008) y en general, la dinámica hídrica asociada a inundaciones y sequías (Rodríguez 2019). Parte de estos estudios han sido

liderados por el CATIE-Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, una característica similar en estas regiones es la escases de datos generados *In-Situ*, en muchos casos los pocos existentes generada por las diferentes entidades estatales son de difícil acceso, por lo que muchas veces se recurre a utilizar información generada por instancias internacionales

Las aplicaciones del modelo han tenido lugar en Costa Rica, en la cuenca del río Pejibaye (Zuleta 2013) cuenca río Jesús María (Ríos *et al.* 2008) cuenca planton-pacayas (Morales *et al.* 2010) en Honduras en la microcuenca Santa Inez (Velásquez 2012), microcuenca río Guacerique (Hernández, *et al.* 2003) en Guatemala en la cuenca río Samalá (Rivas 2016) en República Dominicana en la cuenca del río Yaque, (Rodríguez 2019).

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). El CATIE implementa un proyecto de Adaptación de la agricultura al cambio climático a través de la cosecha de agua, cofinanciado por la COSUDE: Cooperación Suiza en América Central, mediante la implementación de tecnologías de cosecha de agua tipo reservorio, alimentadas por escorrentía superficial y agua lluvia, estas obras permiten a las familias almacenar y disponer de suministro de agua para irrigar sus cultivos y satisfacer la demanda hídrica animal.

Se desarrolló la presente investigación, evaluando el comportamiento espacial de la producción de erosión y sedimentos por escorrentía hídrica, mediante el empleo del modelo hidrológico SWAT en la subcuenca del río Coco-Somoto, para identificar las zonas de la cuenca con mayores aportes de sedimentos y para identificar las obras que están en diferentes categorías de erosión para que las familias productoras beneficiarias de las obras de cosecha de agua, puedan asegurar la durabilidad (mantener la capacidad hidráulica) de estas obras en el mediano y largo plazo, ante posibles efectos negativos de sedimentación desarrollando acciones de mitigación ante posible acumulación de sedimentos por procesos erosivos.

4. METODOLOGÍA

4.1. Ubicación y descripción del área de estudio

La subcuenca del río Coco-Somoto se ubica en la región Central-Norte, corredor seco de Nicaragua entre las coordenadas 1491556 Latitud Norte y 544386 Longitud Oeste, zona UTM 16N, administrativamente en el departamento de Madriz, específicamente en los municipios de Somoto y San Lucas. La subcuenca es un tributario de la cuenca del río-Coco, una de las 6 principales cuencas hidrográficas de Nicaragua (Figura 1). El clima de esta región se caracteriza por una estación seca de noviembre a abril y una estación lluviosa de mayo a octubre, con eventualidades de periodos de canículas entre 15 de julio a 15 de agosto de cada año (Bendaña 2018), la precipitación anual promedio va de 800 a 1200 mm (WGP 2018) y periodos de baja precipitación de 6 a 8 meses (INETER 2021)(INETER 2013). temperatura que oscila entre los 17 a 34°C y altitudes que van desde los 552 a 1736 msnm, siendo una altitud media de 859 msnm a nivel de toda la cuenca, con variabilidad de rangos de pendientes, suelos con textura arcillosas y franco-arcilla-arenosas.

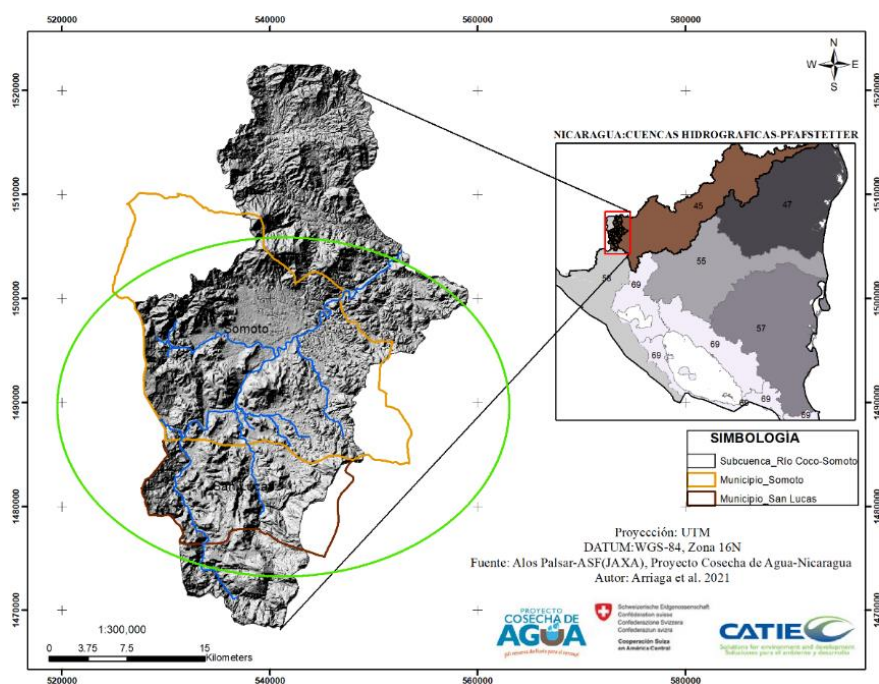


Figura 1. Ubicación de la subcuenca río Coco-Somoto-Madriz, Nicaragua

4.2. Zonas de vida presentes en la zona de estudio

Las zonas de vida, existentes fueron desarrolladas y clasificadas en un sistema de Holdridge, definidas en relación a la biotemperatura y la variable hídrica de precipitación y evapotranspiración potencial (Drozd *et al.* 2018), basándose más en la fisonomía más que en la composición florística

(Pérez *et al.* 2016), en la zona de estudio, se pueden encontrar 6 tipos de zonas de vida (Figura 2; Cuadro 1). El poder ver su cantidad en área y distribución porcentual).

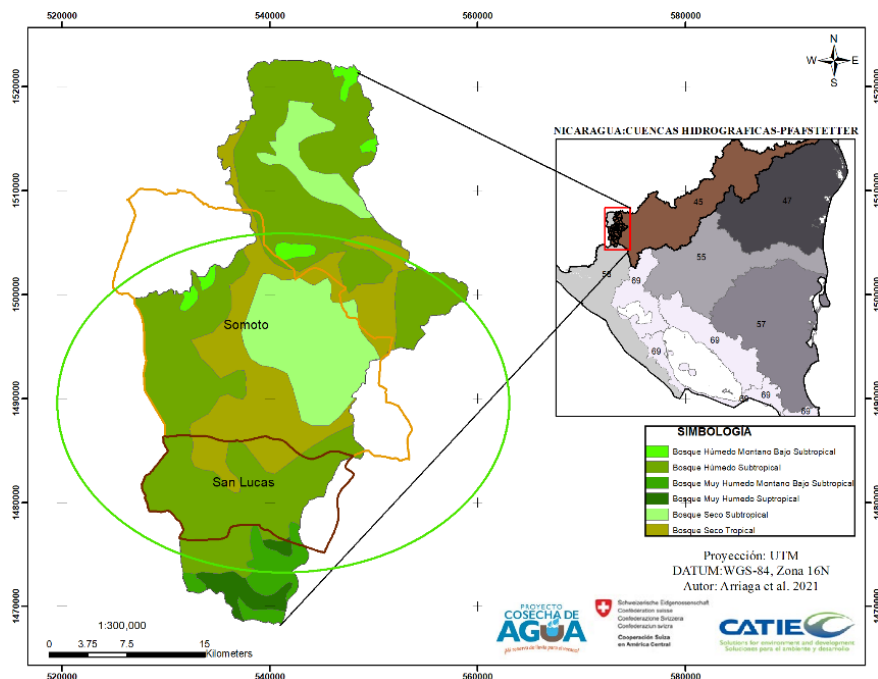


Figura 2. Zonas de vida presente en la zona de estudio

Cuadro 1. Zonas de vida presentes en la zona de estudio

Zona de vida	Área (ha)	Área (%)
Bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical	15,085.32	15.10
Bosque Húmedo Subtropical	46,094.66	46.14
Bosque Muy Húmedo Montano Bajo Subtropical	3,202.59	3.2
Bosque Muy Húmedo Subtropical	2118.035	2.12
Bosque Seco Subtropical	15647.78	15.66
Bosque Seco Tropical	17,731.34	17

4.3. Descripción del modelo hidrológico SWAT

SWAT (Soil Water Assessment Tool) son las siglas para herramienta de evaluación de suelo y agua a escala de cuenca siendo un modelo agro-hidrológico determinístico y distribuido continuo que su principio teórico se basa en la ecuación del balance hídrico (Neitsch *et al.* 2005)), este modelo permite simular procesos físicos del ciclo hidrológico a nivel de cuencas y las divide, a su vez, en

varias unidades agro-hidrológicas de interés (subcuencas) (Arnold *et al.* 1988) (Dile *et al.* 2019), permitiendo diferenciar características entre subcuencas (Kroeger *et al.* 2019). Como por ejemplo, altitudes máximas y mínimas, usos y coberturas y unidades de respuesta hidrológicas-HRUs (Arnol *et al.* 2002) (Hosseini y Khaleghi 2020).

Las HRUs son las unidades hidrológicas espaciales más pequeñas (García *et al.* 2021) (Koycegiz *et al.* 2021; (Ríos *et al.* 2008); Farzana *et al.* 2019), que se convierten en las unidades mínimas de cálculo hidrológico en SWAT (Weber *et al.* 2019), resultan de la combinación de pendientes, usos coberturas y tipos de suelos (Figura 3). Estas determinan el caudal y la concentración de sedimentos en la cuenca (Briak *et al.* 2019).

Los componentes principales del modelo incluyen: clima, escorrentía superficial, los flujos de retorno, la infiltración, la evapotranspiración, pérdidas por transmisión, almacenamiento en reservorios, crecimiento de cultivos, irrigación, flujo de aguas subterráneas, direccionamiento de las corrientes, recargo de nutrientes y pesticidas, transferencia de agua y gestión agrícola (Arnold *et al.* 1988; Morales *et al.* 2010). Una descripción completa de todos los componentes se puede encontrar en Arnold *et al.* (1998) y Neitsch *et al.* (2002).

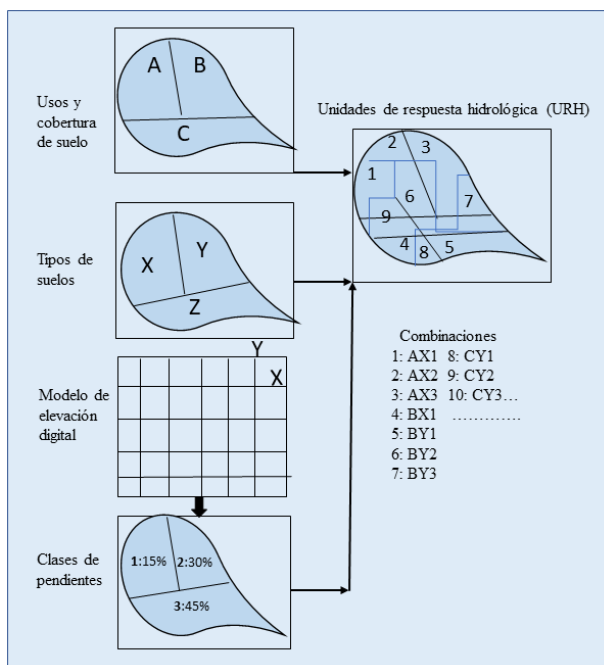


Figura 3. Unidades de respuesta hidrológica en la cuenca

Fuente: Adaptado de Hossein y Khaleghi. (2020)

SWAT calcula los componentes hidrológicos para las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca (Yuan y Forshay 2020) y simula los volúmenes promedios máximos de escorrentía superficial (Uribe 2010), estos volúmenes son el producto de la precipitación de agua lluvia que

no se infiltra en el perfil del suelo, siendo estimado con una modificación del método del número de curva del servicio de conservación de suelo (CSCU-SDA-SCS 1972, citado por Niekst *et al.* 2005), en este método, la precipitación diaria se divide entre la escorrentía superficial, la infiltración así como en función de las condiciones de humedad de suelo (Santhi *et al.* 2006), para determinar la eficiencia de cálculo del escurrimiento superficial, tomando la variable precipitación y comparándola a escala diaria y mensual (Briak *et al.* 2019).

4.3.1. Simulación hidrológica de la zona de estudio

Una vez realizadas las modificaciones a los parámetros de entradas al modelo (reasignación de proyecciones, cambios de información de vectores a ráster) se procedió a definir las condiciones de tiempo de simulación de 30 años, con un periodo de calentamiento de 3 años para la estabilización del modelo y que este reconozca los datos (Gamboa 2018), la corrida del modelo se inició desde el SWATeditor-Database-QSwatV3.1, para obtener las salidas de las variables de interés (subcuencas, HRUs, sedimentos, escorrentía y otros).

La simulación hidrológica de la cuenca SWAT la realiza en dos fases: La primera es la fase terrestre del ciclo hidrológico (Figura 4a), esta fase controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y plaguicidas que llegan a la red hídrica principal en cada subcuenca y la segunda es la fase hídrica o de enrutamiento del ciclo hidrológico (figura 4b), en la que las cargas de sedimentos y agua son transportadas hacia la red hídrica principal usando una estructura de orden semejante a la HYMO (William y Hann, 1972 Citado por Uribe 2010), que tiene lugar cuando el movimiento de agua, sedimentos son transportados a través de la red hídrica desde la parte alta de la cuenca hasta las zonas bajas (punto de salida) (Vital *et al.* 2020) (Arnol *et al.* 2002; Neitsch *et al.* 2011).

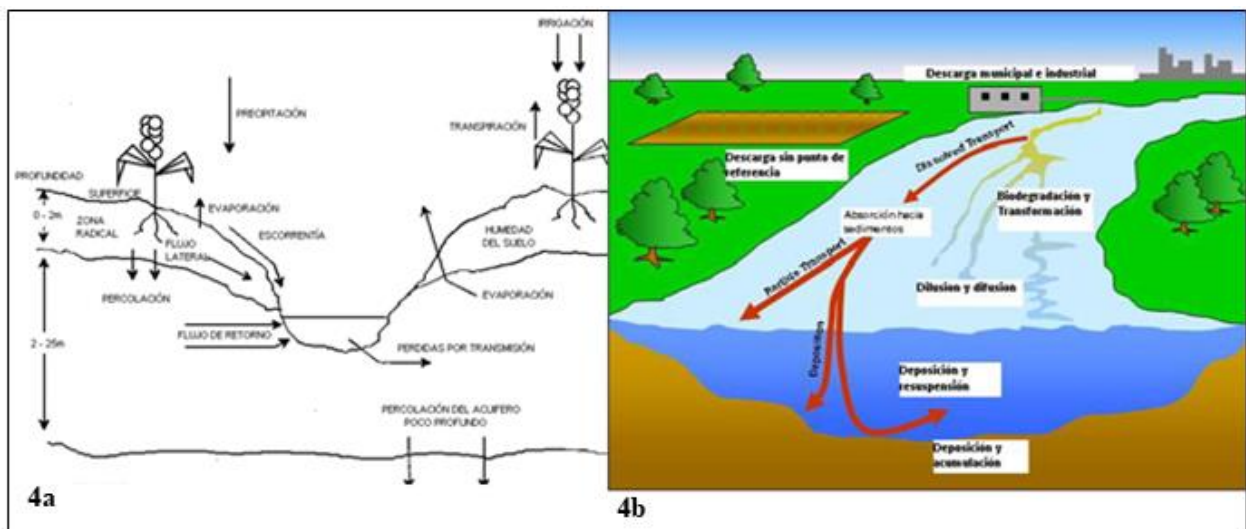


Figura 4. 4a: Fase de terrestre del ciclo hidrológico. 4b: Fase de enrutamiento del ciclo hidrológico

Fuente: Uribe 2010

4.3.2. Estimación de producción de sedimentos con el modelo SWAT

La erosión de suelo puede determinarse por dos métodos “Directos” (parcelas de escorrentía) e “indirectos” (aplicación de ecuaciones o programas) (Faustino 1985) Ríos et al. 2008), en este caso, se utilizó el segundo, donde la erosión de suelo simulada por SWAT en la cuenca hidrográfica fue realizada a través del empleo de la ecuación de pérdida de suelo universal modificada (MUSLE) calculando un evento único de rendimiento de sedimentos (Willians 1975). La MUSLE simula los procesos de erosión y rendimiento de sedimentos para cada unidad de respuesta hidrológica en cada subcuenca (Arnol *et al.* 2002; Santhi et al. 2006), producto de la combinación de escorrentía superficial, tipo de suelo, uso de la tierra y pendientes (Briak *et al.* 2016).

La MUSLE asigna un valor numérico a cada una de las variables, las cuales, multiplicadas entre sí, proporcionan el valor de pérdida de suelo en tn/ha/año, estimando de esta forma la proporción de partículas de suelo que pueden ser removidas y entregadas por eventos de lluvias a los caudales hídricos sean estas redes hídricas naturales o corrientes formadas en las precipitaciones (Kharchaf *et al.* 2013) citado por Briak *et al.* (2016). A diferencia de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo USLE (ecuación 1) que predice la erosión anual promedio en función de la energía de lluvia, la MUSLE Modificada (William 1995) (M_{USLE}) (ecuación 2) reemplaza la energía de la lluvia por un factor de escorrentía utilizando la cantidad de pérdidas para simular la producción de erosión y sedimentos (Rafiei *et al.* 2020; Neitsch *et al.* 2011; Uribe 2010).

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (\text{ecuación 1})$$

A: pérdida de suelo, en mg/ha/año

R: energía erosiva de la lluvia (MJ/mm/ha/h)

K: erosionabilidad del suelo [(mg/h).(Mj/mm/ha/h) -1]

L: relación de pérdida de suelo originada por la longitud de la pendiente

S: relación de pérdida de suelo originada por el gradiente de la pendiente

C: relación de pérdida de suelo originada por el manejo y uso de la tierra

P: relación de pérdida de suelo originada por el uso de prácticas de conservación

$$Sed = 11.8 * (Q_{surf} * q_{peak} * Area_{hru})^{0.6} * K_{USLE} * C_{USLE} * P_{USLE} * LS_{USLE} * CFRG \quad (\text{ecuación 2})$$

Sed: producción de sedimentos en un día dado (ton)

Q_{surf}: volumen de superficie de escorrentía (mm)

Q_{peak}: escorrentía máxima (m³/s)

Área de hru= área de unidad de respuesta hidrológica (ha)

K_{usle}: factor de erodabilidad de suelo (0.013 ton/m²/h)/(m³/ton/cm)

C_{usle}: factor de cobertura y gestión de USLE

P usle= factor de prácticas de conservación de suelos USLE

LS usle= factor topográfico

CFRG= factor de fragmentación de la tierra

4.3.3. Configuración de datos de entrada para corrida del modelo hidrológico SWAT

Comprender los elementos (cuenca, ciclo hidrológico, clima, suelo, coberturas, topografía) previo a realizar modelaciones hidrológicas es tan fundamental como realizar controles de calidad en la información en los datos de entrada, lo que puede conllevar a aumentar la precisión de los resultados, como producto de la simulación de los procesos físicos del ciclo hidrológico a nivel de una cuenca hidrográfica con el empleo de modelos hidrológicos computarizados. Para lograr los objetivos en este estudio se empleó el software SWAT 2012, integrada en los sistemas de información geográfica Qgis 3.16 en su extensión QSWAT3 v1.1.

Se utilizaron diferentes parámetros hidro-edafoclimáticos-espaciales que fueron construidos según lo requiere el interfaz del modelo hidrológico SWAT ver (Tabla 2). El modelo de elevación digital de la zona de estudio fue extraído de la plataforma Alos Palsar/ ASFData SearchVERTEX. La información de clima fue obtenida de la plataforma POWER-Data Access Viewer de la Administración Espacial de Aeronáutica y el Espacio (NASA) específicamente, las variables de temperatura y precipitación con registro de datos para un periodo de 30 años (1990-2020). La información de usos y coberturas fue obtenida del Mapa oficial de usos y coberturas de la tierra-2015 propiedad del Instituto de Estudios Territoriales de Nicaragua (INETER). La información de suelos propiedades físicas (clases texturales, número de horizontes, profundidades máximas y mínimas) se tomaron de la base de datos de suelos armonizada para América Latina y el Caribe SOTERLAC V2.0, a partir de la textura se determinaron el resto de las propiedades químicas utilizando el software características de suelo y agua “Soils Water Characteristics-SPAW-USDA y el software NumCurv. El proceso metodológico se detalla a continuación en la Figura 5.

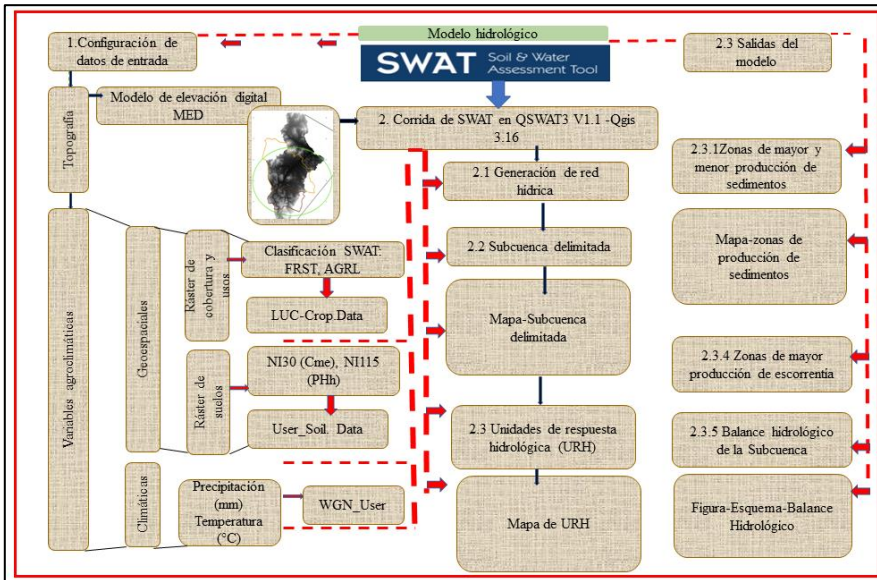


Figura 5. Proceso de preparación de información, configuración y corrida del modelo SWAT

4.3.4. Conjunto de datos de entrada del modelo hidrológico SWAT para el estudio

El modelo hidrológico SWAT requiere una serie de datos de entradas, como: coberturas, suelos, clima y pendiente, para poder simular los procesos físicos asociados, con la hidrología, climatología y dar como salidas (erosión y producción de sedimentos a nivel de cuencas). Los datos que alimentan el modelo determinan las interrelaciones endógenas y exógenas de las unidades hidrológicas las fuentes de obtención, así como sus características de describen a continuación en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Datos de entrada al modelo hidrológico de evaluación de suelos y agua SWAT

Tipo de Dato	Parámetro	Formato	Resolución	Periodo	Fuente	Usos: Para
Mapa de Topografía	Altitud-Modelo de Elevación Digital MED	Ráster	30m x 30m		a	Delimitar la zona de interés y creación de HRUs
Polígono de la zona de estudio	Área	Shapefile			b	

Clima	Precipitación y temperaturas máximas y mínimas diarias	CSV	9 estaciones	1990-2020	c	Simular las condiciones hidrológicas
Mapa de usos y coberturas de suelos	Clasificación de uso de suelo	Ráster	30m x 30m	2015	e	Clasificar usos y crear HRUs
Mapa de suelos	Tipos de suelos	Ráster	30m x 30m		f	Clasificar suelos y crear HRUs
Red hídrica	Red hídrica	Shapefile			g	
Punto aforo		Shape				Determinar punto de cierre

Fuentes: Adaptado a partir de (Betrie *et al.* 2011) (Chen y Chang 2021)

^aAlos Palsar/ ASFData Search VERTEX

^cNASA-POWER-Data Access Viewer

^dEl Reanálisis del Sistema de Predicción Climática (CFSR) de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP)

^eINETER-Proyecto Cosecha de Agua-Nicaragua

^fBase de datos de suelo armonizada para América Latina y el Caribe SOTERLAC 2.0

^{b,g}Proyecto Cosecha de Agua Nicaragua.

4.3.4.1. Modelo de elevación digital

El modelo de elevación digital (MED) de la zona de estudio (Figura 6), se utilizó como uno de los datos principales de entrada al modelo, para definir altitudes de la superficie del terreno de la zona de estudio y determinar la zona alta, media y baja de la cuenca a su vez subdividirla en otras unidades de análisis hidrológicas (HRUs). Los modelos de elevación digital son estructuras numéricas de datos que representan la distribución espacial de las altitudes (Pusineri *et al.* 2005) y sirven como insumo principal para delimitar una unidad hidro-geográfica (CATHALAC 2018).

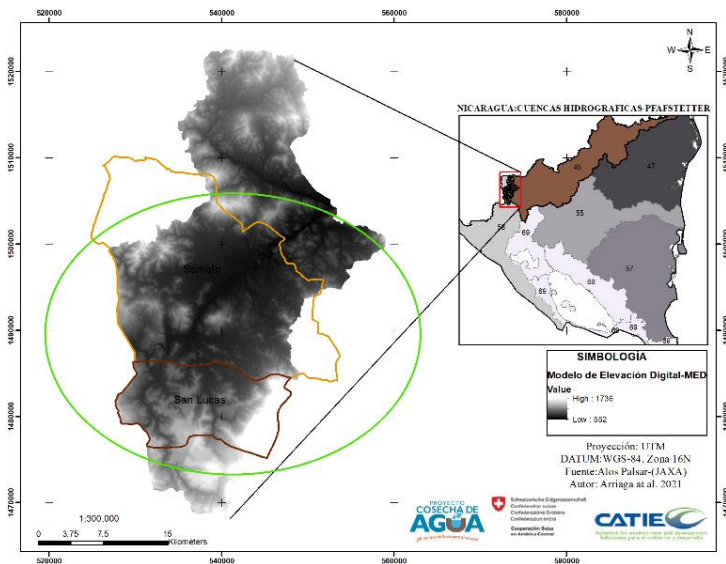


Figura 6. Modelo de elevación digital de la zona de estudio

4.3.4.2. Mapa de pendientes

El Mapa de pendientes de la cuenca se deduce del modelo de elevación digital y explica que la subcuenca del río Coco-Somoto tiene una variada topografía, del territorio el 16.8% comprende pendientes de 0-5, el 20.7% pendiente de 5-15, el 16.8% pendientes de 15-25, el 14.2% pendientes de 25-35, el 31.5% pendientes > a 35%, la distribución espacial de las pendientes (Figura 16). Esta variación de desniveles se atribuye al rango de elevaciones presentes en el MED, lo que puede ser un factor de aumento en la escorrentía superficial y la probabilidad de ocurrencia de procesos erosivos y colmatación cuerpos hidrológicos naturales¹ y antrópicos² (ríos¹, obras de cosecha de agua²) por acumulación de sedimentos.

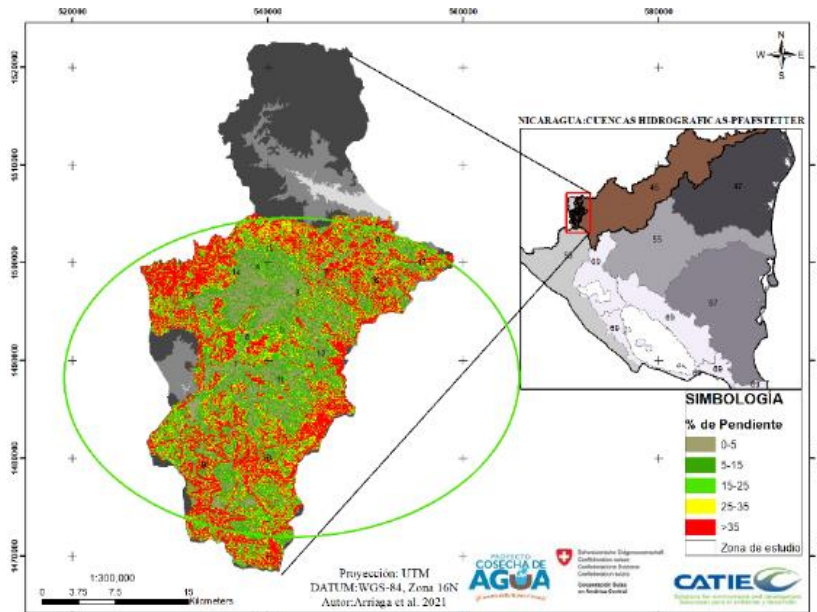


Figura 7. Mapa de clases de pendientes en la zona de estudio

4.3.4.3. Delimitación de la zona de estudio en la cuenca hidrográfica

Mediante el modelo de elevación digital de la cuenca se definió el umbral de escurrimiento de la superficie en hectáreas y kilómetros cuadrados, para crear la red hídrica y definiendo un punto de aforo en la salida de la red hídrica de orden 4, se generó la delimitación de la zona de estudio, este proceso fue realizado en la interfaz interna del modelo hidrológico SWAT, en los sistemas de información geográfica Qgis 3.16 en su extensión QSWAT3 v1.1., el proceso metodológico se puede observar en la (Figura 8.).

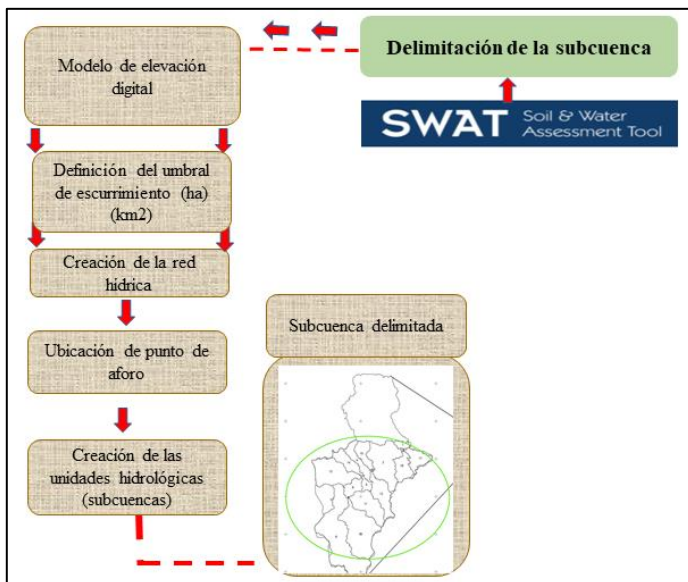


Figura 8. Proceso de delimitación de la subcuenca

4.3.4.5. Información climática

El clima de una cuenca proporciona las entradas de humedad y energía, que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico en una cuenca (Uribe 2010, Salmon 2013) (Arnold et al. 1988). SWAT requiere de datos meteorológicos de paso diario como archivos de entrada, para simular los procesos que tienen lugar en el ciclo hidrológico y determinar internamente los procesos de enrutamiento del rendimiento y transporte de sedimentos desde su origen, hasta su deposición final, en cauces y embalses hídricos (Quintero, M; Rivera 2011).

Los datos meteorológicos de la variable de precipitación y temperatura utilizados comprendieron registros para un periodo de 30 años (1990-2020), a partir de estas dos variables se construyó la Macro de clima WEN_user, a utilizar en el generador climático, este necesita mínimo de 3 estaciones meteorológicas para correr el modelo (Morales *et al.* 2010) en este caso de utilizaron 9 estaciones meteorológicas, para que SWAT simulara el comportamiento climático de la cuenca, el proceso de obtención de la información de clima se describe a continuación. Primero se localizaron las estaciones que estuvieran próximas a la zona de estudio en la plataforma de datos meteorológicos globales para SWAT, Global Weather Data for SWAT, por sus siglas en inglés, se seleccionaron nueve estaciones climáticas (Figura 10) de cada estación se obtuvieron las coordenada geográfica y posteriormente se ubicaron en la plataforma POWER-Data Access Viewer de la Administración Espacial de Aeronáutica y el Espacio (NASA), para extraer lo datos de las variables de interés, el modelo calculó parámetros estadísticos descritos en el (Anexo 1). El proceso metodológico se puede observar en la Figura 9.

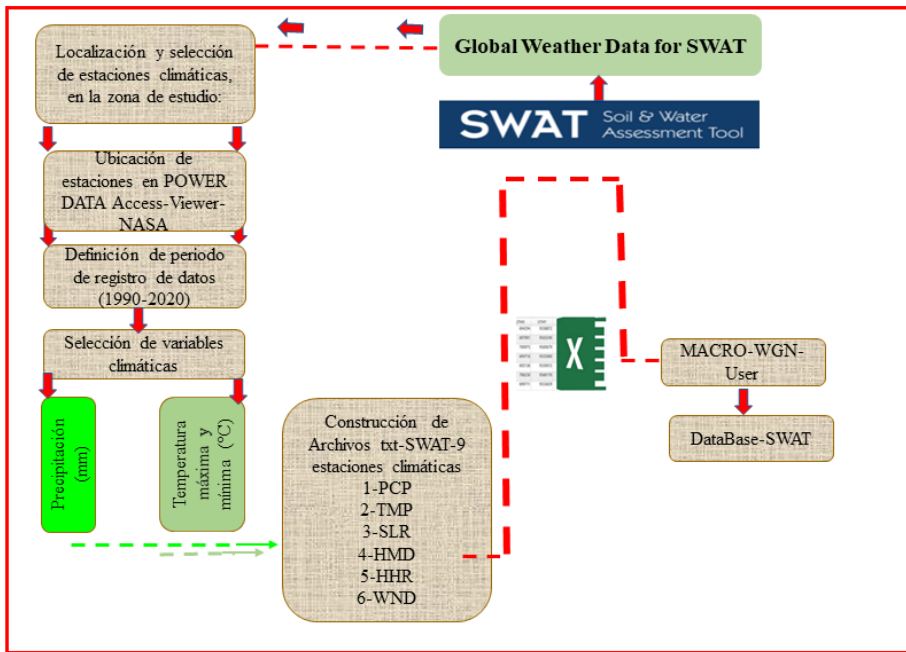


Figura 9. Proceso metodológico para selección de las estaciones climáticas variables de interés y su procesamiento

Los valores diarios para el clima son generados del promedio de los valores mensuales de la precipitación, por lo que a partir de los valores de precipitación diaria de cada estación el modelo genera un conjunto de datos del tiempo para cada subcuenca y estos valores son independientes para cada subcuenca, y para generar la precipitación diaria SWAT utiliza el modelo desarrollado por Nicks (1974) y el generador de la precipitación utiliza un modelo de cadena de primer orden de Markov para definir un día como húmedo-seco comparando un número al azar (0.0-1.0) (Uribe 2010) (Wang *et al.* 2020).

En cuanto a la temperatura utiliza una ecuación de continuidad, que es integrada al generador para justificar variaciones de temperatura y radiación causadas por condiciones secas versus condiciones lluviosas, la temperatura área máxima y la radiación solar se ajustan hacia abajo al simular condiciones lluviosas y se ajusta hacia arriba al simular condiciones secas, estos ajustes los realiza el modelo para que los valores generados a largo plazo para un promedio de temperatura máxima y de radiación solar mensual, concuerden con los promedios de entrada.

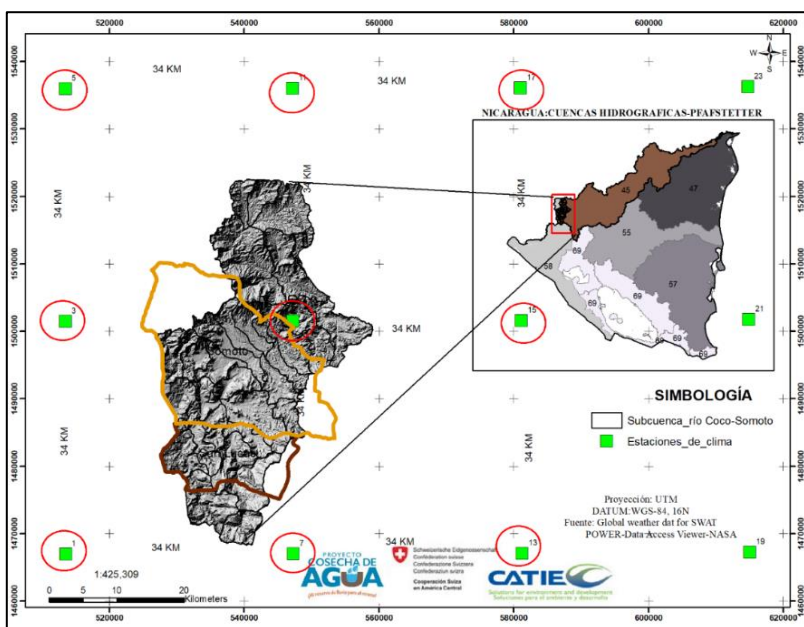


Figura 10. Proceso metodológico de selección de estaciones meteorológicas y variables climática

Se analizaron los registros climáticos de cada estación meteorológica, para observar el comportamiento de las variables climáticas precipitación y temperatura en la escala de tiempo, para la zona de estudio. En la Figura 11, análisis de la estación meteorológica 1, se puede observar que la temperatura máxima se ha mantenido entre 30 y 35°C y la mínima 20 y 25°C y la precipitación ha tenido variaciones por año a lo largo del periodo registrando precipitaciones bajas desde 185 (mm) en el año 1994, hasta precipitaciones altas de 1045 (mm) en el 2019. Los picos altos de precipitación en años específicos está relacionado a diferentes eventos extremos como el Huracán Mitch (1998), la depresión tropical Doce-E en 2010, que causó lluvias intensas en toda la zona de corredor seco (FAO 2016) y uno de las más recientes ETA e IOTA, que dejaron acumulados entre 300 y 1000 milímetros como lo reporta en su informe (FEWS NET 2020).

Por otro lado, de acuerdo con el informe “situación ambiental de Nicaragua 2019” del Centro Humboldt, entre el 20 y 27 de agosto de ese año, precipitaron 600 milímetros de lluvia y entre julio y agosto se estableció el periodo de sequía y en octubre las lluvias fueron intensas, por lo que se declaró estado de alerta verde para la mayor parte de territorio nicaragüense. Mismo patrón se presentó en el 2020, en donde en el Informe “Acumulado de Lluvias y Daños de agosto 2020 Centro Humboldt, producto de la tormenta tropical número 13 y la tormenta 14 Laura en el Caribe y en el Pacífico Tormenta Tropical Marcos, así como la Onda Tropical número 31 y 32 circulando hacía el Caribe en menos de 48 horas estos eventos climáticos dejaron acumulados de entre 12 a 40 mm en la zona norte y mayores en otras zonas del país, sumado a esto el paso de los dos huracanes ETA y IOTA, que en noviembre de 2020 causó fuertes precipitaciones y acumulados en esta zona como en el caribe del país. Este contexto explica la variación de precipitación en la zona de estudio tal como lo muestra la Figura 11.

Un beneficio adicional de los eventos extremos de lluvias, es que las obras de cosecha de agua, en la mayoría de la zona de estudio, alcanzaron su capacidad máxima de almacenamiento. Sin embargo,

la característica principal es lo eventos se sequía extrema (canícula) como por ejemplo en el año 2001, donde los periodos de lluvia fueron similar a la media histórica. Similar al año 2001 en el gráfico, así sucesivamente para los años 2006, 2015 donde los déficit hídricos fueron significativos (FAO 2016). Esto demuestra la variabilidad climática de esta región.

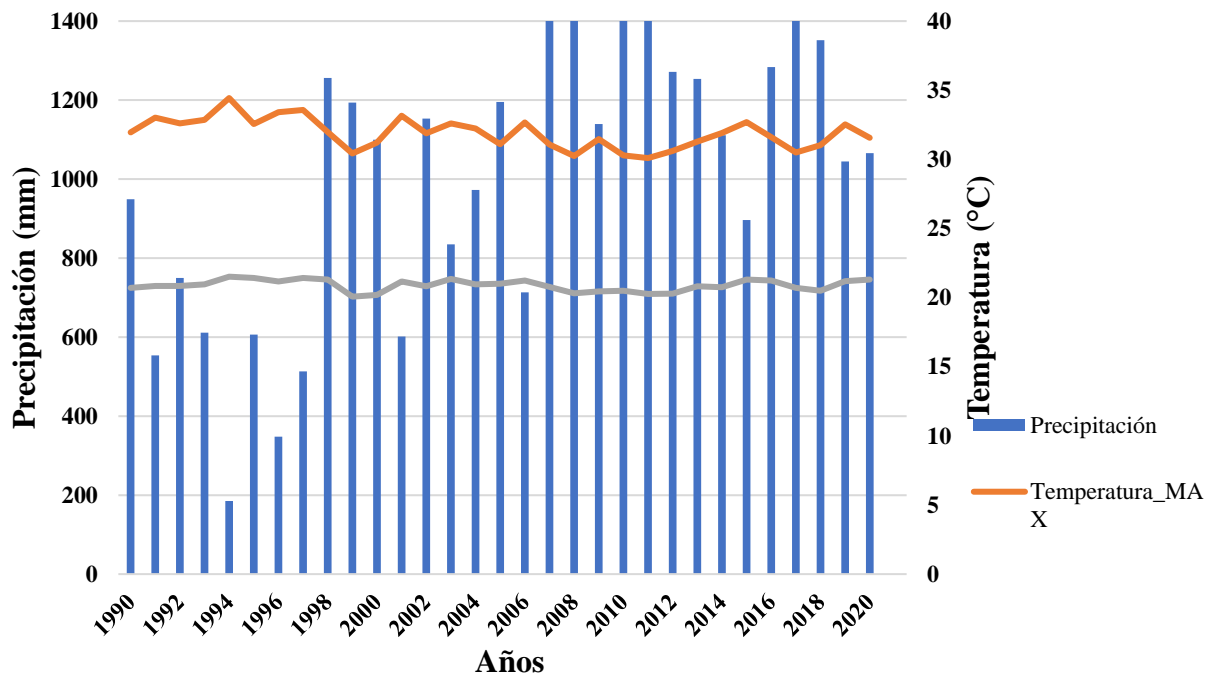


Figura 11. Comportamiento de la variable de precipitación y temperatura en la estación meteorológica número 1, en la zona de estudio

Nota: Este gráfico no representa el comportamiento a una escala local de la zona de estudio, en el sentido que la estación NASA, están a escala más global con una resolución de $1/2^\circ \times 5/8^\circ$

4.3.4.6. Usos y cobertura de suelos

La base de datos de plantas y/o cubierta terrestre interna de SWAT contiene la información relacionada de diferentes materiales vegetales que necesita SAT para simular el crecimiento de las plantas, para esto utiliza un modelo de crecimiento de planta, el cual valora la eliminación del agua, los nutrientes de la zona radicular la transpiración y la producción de biomasa (Niekst *et al.* 2005; Uribe 2010). El modelo simula el crecimiento de plantas anuales y perennes (Arnold *et al.* 1988), en función del índice foliar, conductividad estomática, profundidades máximas de las raíces, y temperatura óptimas y mínimas (Betrie *et al.* 2011).

A pesar de que la temperatura mínima base de crecimiento de cada planta varía en función de su estado fenológico SWAT ignora esta variación y utiliza la misma temperatura base durante la etapa de crecimiento (Uribe 2010), basándose en la acumulación diaria de unidades de calor, entendiendo el modelo que los cultivos anuales crecen desde la fecha de siembra hasta la fecha de cosecha o

hasta que las unidades de calor acumuladas alcanzan las unidades potenciales de calor (Krysanova et al 2000). El mapa de uso y cobertura de la tierra-2015 utilizado para este estudio fue tomado del Instituto Nicaragüense de estudios territoriales-INETER (Figura 12).

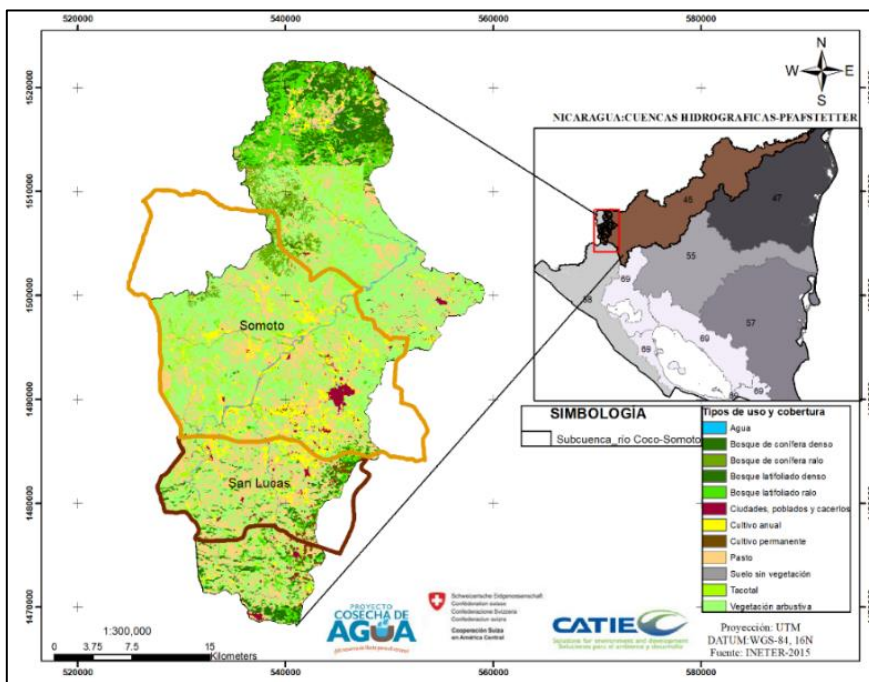


Figura 12. Tipos de usos y coberturas en la zona de estudio-INETER 2015

El cuadro 3 muestra los 12 tipos de usos y coberturas presentes en la zona de estudio, ante de haber realizado una agrupación para acomodarlos de acorde a la nomenclatura de SWAT.

Cuadro 3. Clasificación inicial de usos y coberturas predominantes en la zona de estudio

Número	Tipo de usos y cobertura	Fuente de clasificación
1	Agua	
2	Bosque de conífera denso	
3	Bosque de conífera ralo	
4	Bosque latifoliado denso	
5	Bosque latifoliado ralo	
6	Ciudades poblados y caseríos	INETER-2015
7	Cultivo anual	
8	Cultivo permanente	

9	Pasto
10	Suelo sin vegetación
11	Tacotal
12	Vegetación arbustiva

El cuadro 4 muestra la agrupación realizada de los usos y coberturas a los cuales se les asignó una codificación de cuatro letras en base a la nomenclatura de la DataBase-Crop de SWAT los códigos por uso fueron adaptados de SWAT Input/Output File Documentation, Versión 2012 (Anexo 2).

Cuadro 4. Agrupación de usos y coberturas con base a la clasificación inicial de INETER-2015

Número	Tipo de usos y cobertura	Nomenclatura-SWAT
1	Suelos desnudos	BSVG
2	Cultivos anuales	CORN
3	Bosques Latifoliados	FRSE
4	Pasto	PAST
5	Bosque de coníferas	PINE
6	Vegetación arbustiva	RNGB
7	Cultivos permanentes	SGTB
8	Tacotal	SHRB
9	Ciudades, Poblados, Caseríos	URMD
10	Agua	WATR

Fuente: Adaptado de SWAT Input/Output File Documentation, Versión 2012

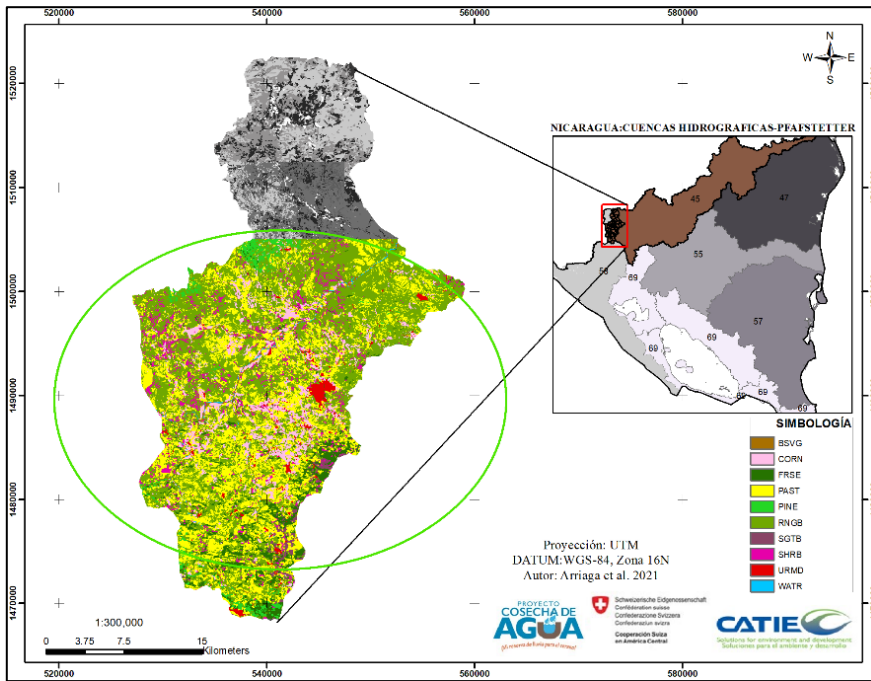


Figura 13. Usos y coberturas de acuerdo con la nomenclatura de SWAT para la zona de estudio

4.3.4.7. Tipos de suelos

El suelo es un cuerpo natural conformado por sólidos, líquidos y gases, ocupando un espacio y caracterizándose por sus horizontes o capas como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia (Soil Survey Staff, 1999, Citado por USDA 2014). El suelo es un factor determinante para los procesos hidrológicos, como Escorrentía superficial, infiltración, agua disponible para cultivos, conservación de humedad (Morales *et al.* 2010).

El mapa de suelos de la zona de estudio (Figura 14) determina los diferentes tipos de suelo presente en el área de estudio, concibe toda la información que describe las características físico-químicas de cada perfil del suelo presente en la zona de estudio.

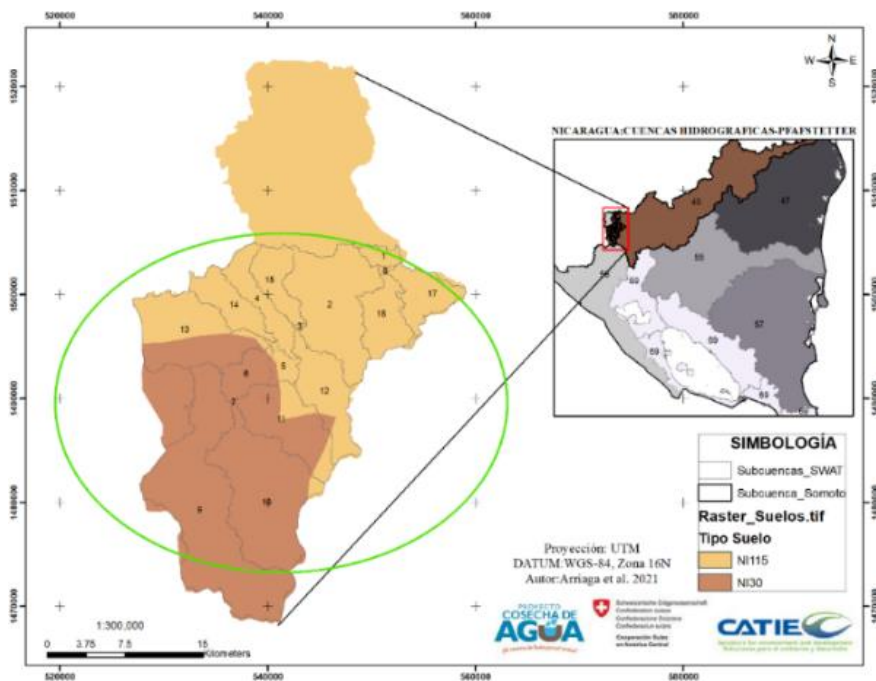


Figura 14. Mapas de tipos de suelos presentes en la zona de estudio

Las clases de suelo y sus texturas (arcilla, limo, arena), profundidades máximas y mínimas) se obtuvieron de Base de datos de suelos Armonizada para América Latina y el Caribe SOTERLAC versión 2.0. La densidad aparente, la capacidad de agua disponible, la conductividad hidráulica saturada, se determinaron en el programa SPAW-USDA (Figura 15), este programa simula procesos hidrológicos, determinando el contenido hídrico, tensión, punto de marchitez, capacidad de campo, saturación y conductividad hidráulica del suelo, a partir del contenido de arena, limo y arcilla, (Saxton 2002).

Los grupos hidrológicos a los que pertenecen los suelos se determinaron con programa Nuncur. La erodabilidad de suelo, albedo húmedo de suelo, contenido de carbono orgánico, se determinaron a partir de la USLE-K en excel. El contenido de materia orgánica se asoció con los valores de materia orgánica realizada por INTER en el 2018 (Anexo 3). Todas las propiedades de los suelos, así como las fuentes de obtención, las contiene el anexo 4.

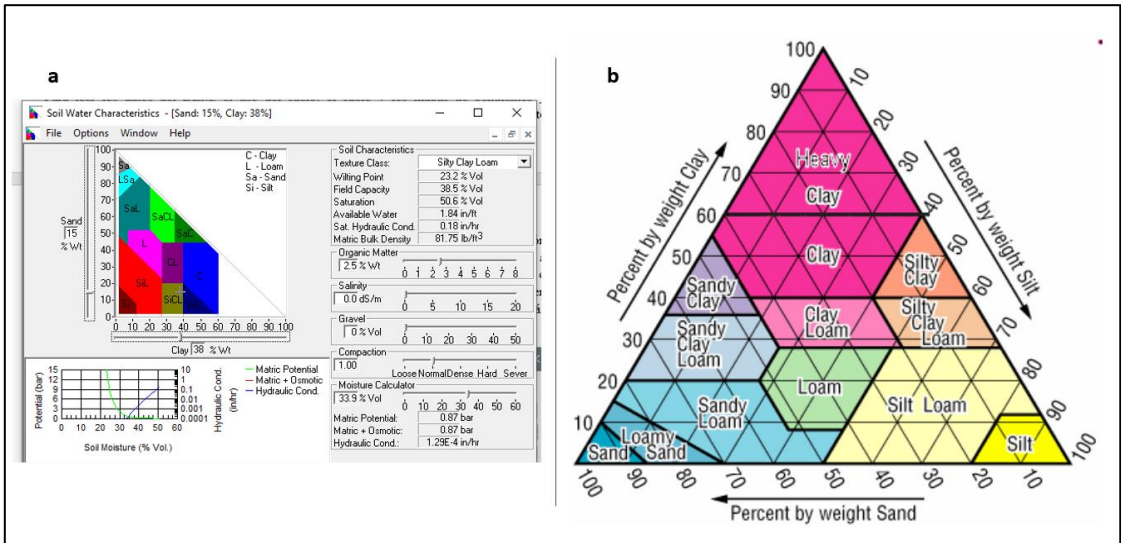


Figura 15. Software SPAW-USDA, usado para determinar características físico-químicas de los suelos de la zona de estudio

Fuente: Nachtergaele *et al.* (2012), Vásquez (2009)

Los suelos presentes en la zona de estudio son Cumulic Haplustoll-PHh (NI115), que representa el 48% de los suelos del área de estudio este pertenecen al grupo hidrológico “D” con alto potencial de escorrentía superficial e infiltración muy lenta <0.03 mm/día y los suelos Typic Ustropept-CMe (NI30), que representan el 52%, perteneciente al grupo hidrológico “C” con moderado a alto potencial de escorrentía con infiltración lenta de 0.03 a 0.12 mm/día (Soil Conservation Service 1972b; citado por Grassi. 1991). Lenta a muy lenta capacidad de infiltración “D < 13mm/h” “C13-36 mm/h” (SCS 1964) Normalmente, por la ubicación de la zona de estudio “región centro norte” presentan texturas franco-arcillosas francos-arenosos-franco-areno-limoso (Bendaña 2018), las propiedades fisicoquímicas se describen en el (Cuadro 5).

Cuadro 5. Tipos de suelos y sus características físico-químicas

Suelo	Clasificación-FAO	Área (ha)	Área (%)	Sol_AWC	Sol_K	Sol_BD	Grupo hidrológico	Textura de suelo
NI30	Typic Ustropept-CMe	29390.3	51.21	0.13	3.6	1.28	C	Franco-Arcilloso
NI115	Cumulic Haplustoll-PHh	30852.2	48.79	0.14	14.05	1.35	D	Franco-Arcillo-Arenoso

Sol_AWC: Contenido de agua en el suelo (mmh20/mm suelo)

Sol_K: Conductividad hidráulica saturada (mm/h)

Sol_BD: Densidad aparente (g/cm³)

5. RESULTADOS y DISCUSIÓN

5.1. Simulación del Balance hidrológico de la zona de estudio

El área de interés de proyecto, donde se ubican las obras de cosecha de agua por escorrentía superficial tipo reservorio, fue determinada con el delimitador automático del modelo hidrológico SWAT, resultando un área de 602.5 km², lo que representa un 69.75% del área total que comprende la subcuenca del río Coco-Somoto. Este tamaño de área sigue comprendiendo el principio de subcuenca de acuerdo con la clasificación propuesta por Faustino y Jiménez (2000), quienes indican que áreas hidrológicas entre 500-2000 km² se clasifican como subcuencas. SWAT dividió el área de interés en 17 unidades hidrológicas (subcuencas) y un total de 728 unidades de respuesta hidrológica (HRUs) (Figura 16).

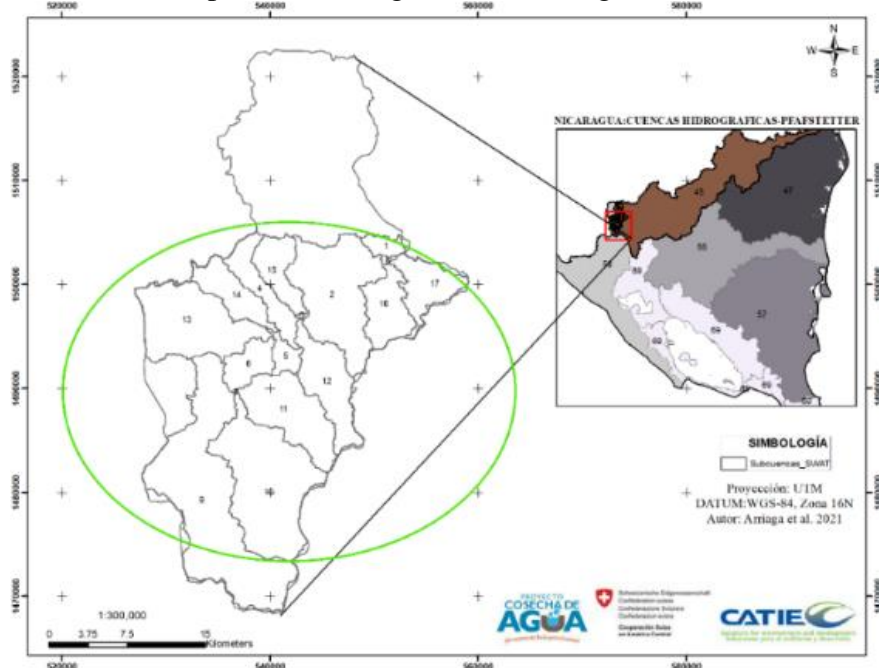


Figura 16. Subcuencas delimitadas por SWAT

Para las 17 subcuencas SWAT, generó información topográfica (elevaciones) y número de HRUs, datos contenidos en el (Anexo 5).

Para modelar el balance hidrológico de la subcuenca (Figura 17), el modelo SWAT empleó la ecuación del balance hídrico descrita a continuación por (Arnol *et al.* 2002; Neitsch *et al.* 2005).

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde:

SW_T = contenido final del agua del suelo en (mm H₂O)

SW_0 = contenido inicial del agua del suelo en el día i (mm H₂O)

cT = tiempo en días

R_{day} = cantidad de precipitación en el día i (mm H₂O)

Q_{surf} = cantidad de escorrentía superficial en el día i (mm H₂O)

E_a = cantidad de evapotranspiración en el día i (mm H₂O)

W_{seep} = cantidad de agua que percola en el perfil de suelo en el día i (mm H₂O)

Q_{gw} = cantidad de flujo de retorno en un día i (mm H₂O)

En la simulación inicial, se obtuvieron los resultados promedios para las siguientes variables para el periodo (1990-2020). La precipitación a nivel de la cuenca es de 1047.7 mm, este valor se encuentra comprendido entre el rango de 800 a 1400 mm media anuales reportados por el Instituto de Estudios Territoriales-INETER, Citado por MEFCCA *et al.* 2018) y (Global Water Phaterships y Bendaña 2018) reportan que la medias anuales de 750 a 1800 mm anuales para esta zona, la evapotranspiración real es de 155.7 mm y una escorrentía superficial de 198.6 mm, que representa el 18.9 % de la precipitación ocurrida y una pérdida de agua por evapotranspiración de 155.7 mm.

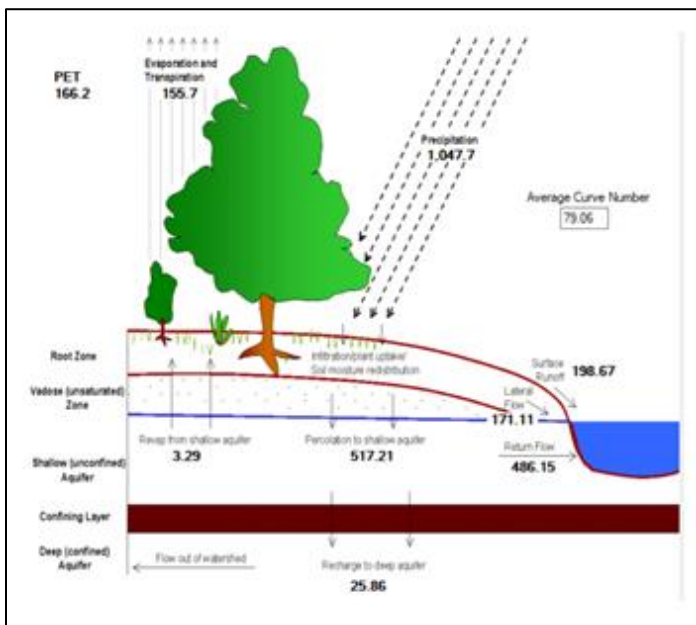


Figura 17. Representación esquemática del balance del ciclo hidrológico de la zona de estudio. El cuadro 6 presenta los valores de la simulación. La producción de agua de la cuenca es de 855.9 mm, lo que equivale al 81.69% de la precipitación simulada. Esta se determina de la sumatoria del flujo lateral, flujo de retorno y escorrentía superficial (Rodríguez 2019 y Carvajal 2017).

Cuadro 6. Cálculos de los componentes del balance hidrológico, simulados por SWAT

Componentes	Abreviación	Valores	% de precipitación ocurrida
a. Precipitación	PP (mm)	1,047.7	
b. Evapotranspiración	ET (mm)	155.7	
c. Escorrentía superficial	SURQ (mm)	198.67	18.9%
d. Flujo lateral	LATQ (mm)	171.11	
e. Flujo retorno	GWQ (mm)	486.15	
f. Producción de agua Carbajal	WYLD (mm)	864	(c+d+e) 81.6%
g. Erosión hídrica	SYLD t ha ⁻¹ año ⁻¹	158.15	

Nota: con base en el promedio de la modelación hidrología de SWAT

5.2. Erosión de suelo: niveles de erosión y su distribución espacial

La modelación hidrológica con SWAT determinó que la erosión media de la producción de sedimentos en la subcuenca río Coco-Somoto es de 6 t ha⁻¹ año⁻¹ aun cuando el 46.9% del territorio se encuentra en niveles de erosión (media-alta-muy alta).

Los resultados obtenidos son similares a los encontrados por Morales *et al.* (2010) quienes encontraron una producción media de 7.6 t ha⁻¹ año⁻¹ al realizar una modelación hidrológica con SWAT en la microcuenca Plantón Pacayas-Costa Rica, y menores a los encontrados por (Rodríguez 2019), quien al realizar una modelación hidrológica en la cuenca del río Yaque, República Dominicana encontró que la producción media de sedimentos por erosión de suelos era de 24 t ha⁻¹ año⁻¹. Los resultados de estos investigadores pueden diferir dado que las condiciones agroclimáticas de las zonas de estudios, comparadas a las de este estudio varían significativamente para el caso de régimen de precipitación, temperatura, suelos y coberturas.

Carvajal (2017) y Zavaleta (2013) encontraron resultados de 122 y 166 t ha⁻¹ año⁻¹ mayores a los de este estudio, al realizar modelaciones hidrológicas con SWAT para evaluar el comportamiento de la dinámica hídrica sobre suelo y coberturas, en diferentes cuencas hidrográficas de Costa Rica. La diferencia de estos resultados puede estar condicionados a que las condiciones agroclimáticas son muy diferenciadas con respecto a las del corredor seco Centroamericano. Debido a que SWAT emplea la ecuación universal de pérdida de suelo (MUSLE) para predecir la erosión, se encuentran otros estudios como los de Ramírez et al (2012),

quienes al aplicar esta ecuación, en combinación con SIG, encontraron producción de sedimentos < a 10 t ha⁻¹ año⁻¹ en una zona de Argentina y (Estrada *et al.* 2012) con la misma ecuación determinaron una erosión media de 203 t ha⁻¹ año⁻¹ en una subcuenca río Cristóbal, Guatemala.

De acuerdo con los niveles de erosión adaptados de criterios internacionales para Nicaragua (INETER 2005) (Cuadro 7), la cuenca en general, se encuentra en nivel de erosión baja, debido a que los resultados están entre 5-12 t ha⁻¹ año⁻¹, lo cual se puede considerar una erosión tolerable o pérdida de suelo tolerable de acuerdo a (Wischmeier y Smith, 1978) que aseveran que si esta entre 5-10 t ha⁻¹ año⁻¹ es tolerable dada las condiciones de profundidad y otras propiedades físico-químicas del suelo presente en la zona de estudio.

Por otra parte, si tomamos la clasificación de erosión de FAO (1980), citado por (Carvajal 2017), el área de interés de la cuenca en estudio se encuentra en nivel de erosión baja dado que los resultados son < a 10 t ha⁻¹ año⁻¹.

Cuadro 7. Niveles de erosión para Nicaragua adaptados de criterios internacionales

Niveles de erosión	Pérdida se suelo t/ha/año	Pérdida se suelo en mm
1-Baja	5-12	0.4 -2
2-Media	12-25	2-5
3-Alta	>25	>5

Fuente: INETER 2005, Adaptados de Wischmeier y Smith, 1978; Roffe, Ligtenberg, et, al 2004

A nivel de subcuencas, las que aportan mayor producción de sedimentos dadas sus características agro-hidrológicas; ubicación (sección alta) y topografías pendientes >25%, son la número 9, 10 y 11 (Figura 18a y 18b), similares condiciones encontraron (Rodríguez 2019) en su estudio, donde las unidades hidrológicas con mayor producción de sedimentos se ubicaban en la sección alta de la cuenca y en pendientes más pronunciadas.

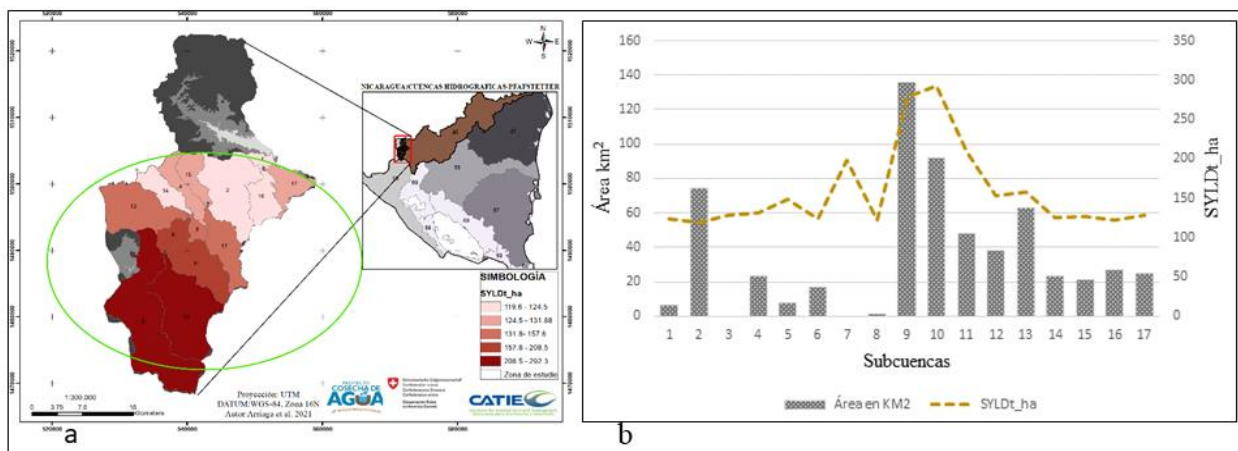


Figura 18. a; Mapa de la dinámica de producción de sedimentos, b; subcuencas con mayor producción de sedimentos

Las subcuencas 9,10 y 11, aportan el 29% de sedimentos en comparación a los 14 restantes que aportan el 71% (Cuadro 8).

Cuadro 8. Aporte de sedimentos por erosión de las subcuencas en SYLDt_ha y porcentajes

a.Cuenca	b.Área (Km ²)	c.SYLDt_(ha)	d.Erosión/cuenca (%)	a	b	c	c
1	6	123.25	4.6	11	48	208.67	7.8
2	74	119.65	4.5	12	38	153.77	5.7
3	0	128.25	4.8	13	63	157.81	5.9
4	23	131.88	4.9	14	23	124.54	4.6
5	8	148.72	5.5	15	21	126.22	4.7
6	17	123.25	4.6	16	27	122.88	4.6
7	0	198.48	7.4	17	25	127.68	4.7
8	1	122.43	4.6				
9	136	278.77	10.4				
10	92	292.33	10.9				

Nota: Las letras a, b, c y d corresponden a los mismos nombres de las columnas del lado izquierdo del cuadro.

Los anteriores valores de producción de sedimentos están asociados a que son las unidades hidrológicas (9,10,11) con mayores cantidades de producción de escorrentía superficial con promedios anuales de 150 a 292mm/año (Figura 19a y 19b).

La contribución de la escorrentía superficial de estas tres unidades hidrológicas es de 28.1% de la escorrentía total comparada a las otras 14 que aportan el 71.9% (Cuadro 9). Esta relación puede ser explicada debido a los tipos de suelos presentes en esta zona de estudio, los cuales pertenecen a grupos hidrológicos “C y D” que de acuerdo con Soil Conservation Service (1972b), citado por Grassi (1991), suelos bajo estos grupos hidrológicos presentan de “moderada a alta potencial de escorrentía superficial. El comportamiento de la escorrentía superficial y de la precipitación de las subcuencas con mayor contribución se puede observar en los Anexos 6 y 7, esto está relacionado con que son las subcuencas que registran los mayores promedios de precipitación con 1093.75 milímetros anuales como lo muestra la Figura 20.

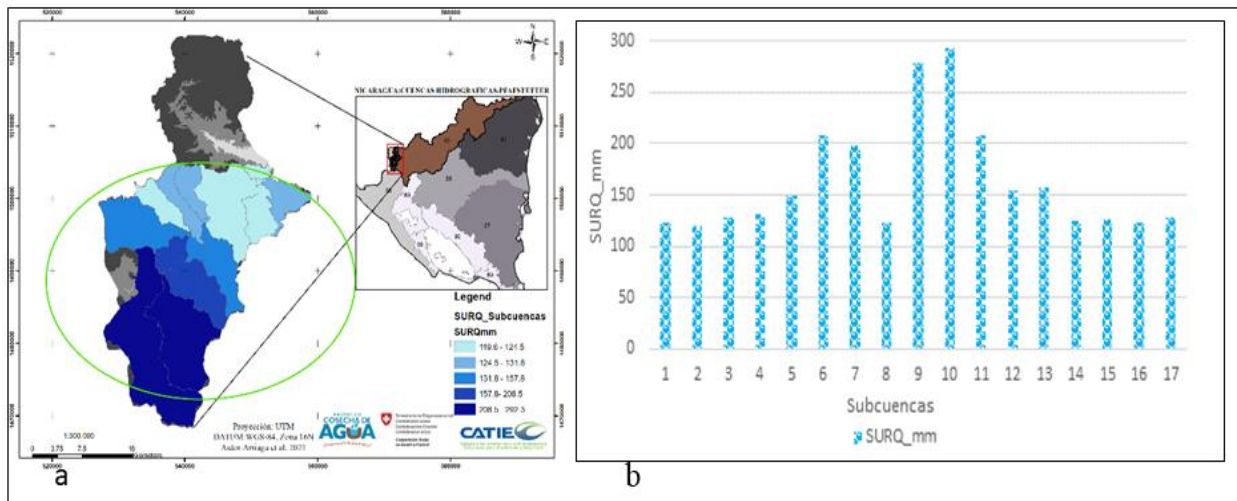


Figura 20. a; Mapa de la dinámica de SURQ_mm/Subcuencas b; contribución de SURQ_mm por subcuenca

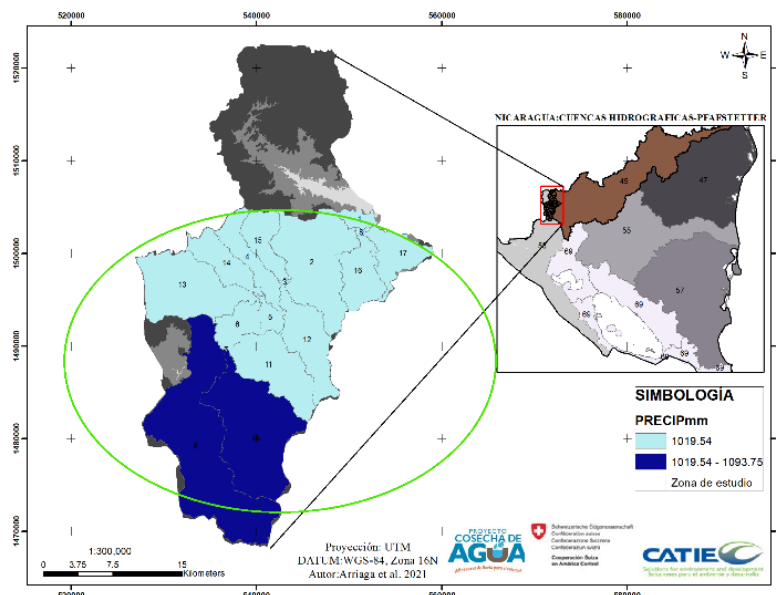


Figura 19. Mapa de la dinámica de precipitación (mm) de las subcuencas

Cuadro 9. Porcentaje de contribución de SURQ_mm, por subcuenca

(a)Cuenca	(b)Área en Km ²	(c)SURQ_mm	(d)SURQ/cuenca (%)	(a)	(b)	©	(d)
1	6	123.25	4.4	11	48	208.56	7.5
2	74	119.65	4.3	12	38	153.77	5.5
3	0	128.25	4.6	13	63	157.81	5.7
4	23	131,88	4.8	14	23	124.54	4.5
5	8	148.72	5.4	15	21	126.22	4.6
6	17	208.19	7.5	16	27	122.88	4.4
7	0	198.48	7.2	17	25	127.68	4.6
8	1	122.43	4.4				
9	136	278.77	10.1				
10	92	292.33	10.5				

Nota: Las letras a, b, c y d correspondes a los mismos nombres de las columnas del lado izquierdo del cuadro

Los niveles de erosión en la zona de interés de la subcuenca van desde “muy baja, hasta muy alta” (Figura 21a). El 34.4 % del territorio se encuentra en nivel de erosión “muy baja” el 18.7% en nivel de erosión baja el 27.3% se encuentra en erosión media, el 7.7% en erosión alta y el 11.9% en nivel de erosión “Muy Alta (Cuadro10). La distribución espacial de la erosión de suelos va desde 0 a 362 ton/ha/año (Figura 21b). La variable que incide en la producción de sedimentos es la pendiente sumada la escorrentía superficial y lo regímenes de precipitación.

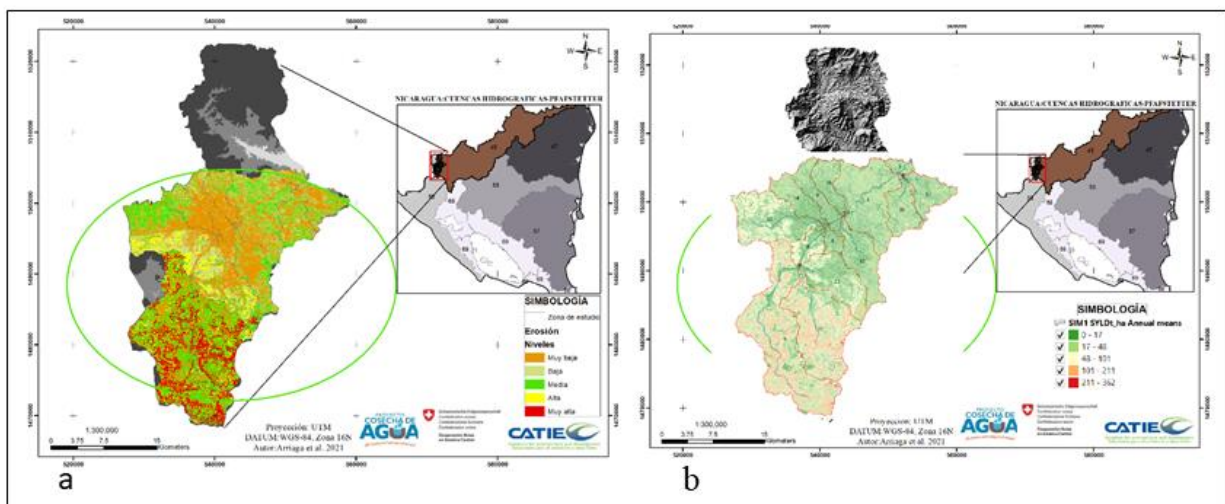


Figura 21. A) Niveles de erosión en la zona de estudio, b) Distribución espacial de la erosión

Cuadro 10. Niveles de erosión y distribución de área en la zona de estudio

Niveles erosión	Área (ha)	Niveles erosión % de área	Parte de la cuenca, donde se ubica la erosión
Muy alta	7151.6	11.9	Alta, media, baja
Alta	4654.9	7.7	Alta, media, baja
Media	16449.4	27.3	Alta, media, baja
Baja	11264.8	18.7	Media, baja, baja
Muy baja	20695.6	34.4	Alta, media, baja

Cuadro 11. Niveles de erosión por rangos de pendientes

%pendiente	0-5 (16.8)	5-15 (20.7)	15-25 (16.8)	25-35 (14.2)	>35 (31.5)
Niveles de erosión					
Muy alta				X	X
Alta			X	X	X
Media		X	X	X	X
Baja	X	X	X	X	X
Muy baja	X		X		

5.3. Variables del balance hídrico para la zona de estudio según sus usos y coberturas

La cobertura de suelo dominante en la zona de estudio es vegetación arbustiva, con el 46% del área distribuida en toda la cuenca, pero de forma más representativa al norte, oeste y este, de la cuenca, seguida de la pastura en toda la cuenca, pero más al sur con un 29.7%, la distribución espacial de los usos y coberturas de la tierra observan en la Figura 13, las cantidades en áreas y otras características se muestran en la (Cuadro 12).

Cuadro 12. Distribución de usos y coberturas y/o otras características de la zona de estudio

Uso de suelo	Descripción	Área ha	Área en km ²	Porcentaje de área por uso	SED (th)	SURQ (mm)	erosión por uso (%)
PINE	Bosque de coníferas	1165.5	11.65	1.93	51.5	125.4	11.6
RNGB	Vegetación arbustiva	27766.8	277.79	46.0	38.7	155.5	8.7
PAST	Pasto	17947.0	179.43	29.78	36.41	244.34	8.2
FRSE	Bosque latifoliado	2985.9	29.85	4.95	78.56	171.5	17.7
CORN	Cultivos anuales	4951.6	49.52	8.21	25.93	292.6	5.9
SHRB	Tacotal	3071.8	30.73	5.1	23.36	159	5.3
URMD	Ciudades Poblados	1057.6	18.58	1.75	6.0	360.1	1.4
WATR	Agua	217.3	2.17	0.36	0	0	0
BSVG	Suelo desnudo o nula vegetación	501.8	5.02	0.83	7	176.4	1.6
SGTB	Cultivos permanentes	576.94	5.77	0.95	175.24	342.56	39.6
Total			602.51	100	442.7	2027.6	100

Lo anterior evidencia que la subcuenca tiende a ser de uso ganadero a baja escala, y con potencialidad de expansión en el tiempo, lo que refleja que las pasturas es uno de los usos de suelo

con mayores áreas en cuencas de Nicaragua, comparados a otros usos. Simón *et al.* (2020), mediante la aplicación de un método de agricultura biointensiva en la región norte del corredor seco de Nicaragua, encontraron que las pasturas dominan un 31%, comparados a otros usos, (Chaves 2012) encontró que la cuenca del río Compasagua-Nicaragua el 57.9% estaba dominada por el uso de suelo bajo pasturas, (Reyes y Celestino 2001) encontraron que en la microcuenca Cuscamas-Matagalpa, las pasturas dominaron un 28.57% más que otros usos. Esto puede estar relacionado a que en la clasificación supervisada del “Mapa Centroamericano de cobertura y uso de la tierra para el año 2010, realizada por (Hernández *et al.* 2011) citado por (Girón 2019), encontraron tres grandes clasificaciones dominantes en las que figura las pasturas con un 17.38% de toda la superficie de América Central, y un 19.17% para los usos y coberturas de Nicaragua, muchas áreas de este uso están dentro de cuencas hidrográficas.

El usos y cobertura de suelo con mayores rendimientos en producción de sedimentos en toneladas por hectárea son bajo cultivos agrícolas: cultivos permanentes (SGTB) (175.24 th), así mismo el que presenta mayor escorrentía superficial con (342.5 mm) ver figura (22a y 22b). (Panduro 2013) y (Gamboa 2018) al aplicar SWAT en la microcuenca Purrires y microcuenca Prusia en Costa Rica encontraron que, de igual forma, los usos bajo cultivos producían mayor rendimiento de sedimentos en relación con otros usos y coberturas. Estrada et al (2012) encontraron que al aplicar la ecuación MUSLE, que es la que integra SWAT las áreas con mayor producción de sedimentos era bajo usos agrícolas y con mayores precipitaciones en una subcuenca del río Cristóbal en Aquitlan-Guatemala.

Xiaojing *et al.* (2021), de igual forma, encontraron que en la zona DELTA de Misisipi EEUU, que los usos bajo cultivos agrícolas fueron los que presentaron mayor producción de sedimentos y escorrentía superficial, lo que refuerza la evidencia que los tipos de usos y cobertura, manejo y otros factores a nivel de las cuencas inciden en la producción de sedimentos tal como lo menciona Ríos *et al.* (2006).

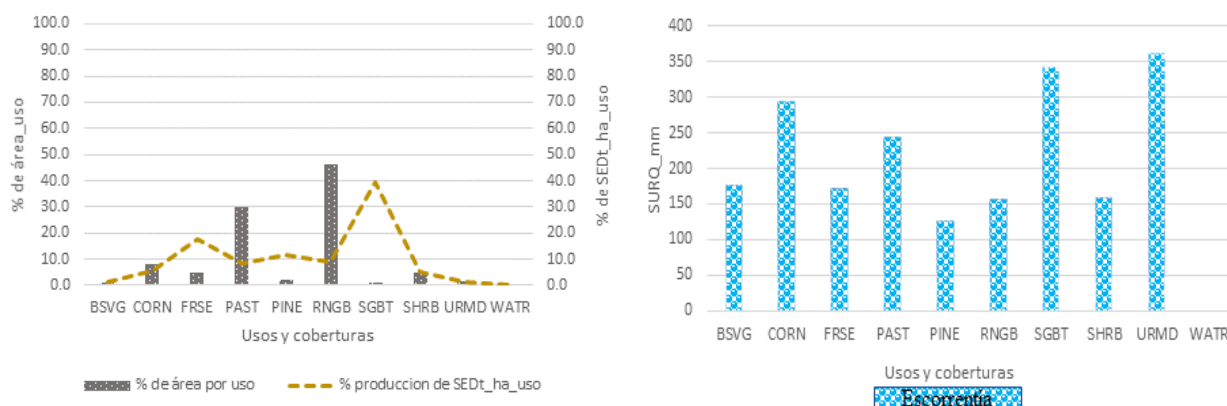


Figura 22. a) Erosión por porcentaje de área según cobertura y uso b) Escorrentía superficial por usos y coberturas

5.4. Distribución y cantidad de obras de cosecha de agua en la zona de estudio

La Figura 23a, muestra la distribución espacial de las obras de cosecha de agua de escorrentía tipo reservorio, por sección topográfica (alta-media-baja), en la zona de interés, hay un total de 236 obras, el 33% de las obras se encuentran en la parte alta de la subcuenca, 38% en la parte media y el 28% en la parte baja a diferentes niveles de altitud (Cuadro 13). Estas obras tienen diseños semicirculares y en forma de trapezoidal (Figura 23b), tienen una capacidad hidráulica de almacenamiento de entre 800 a 7500 metros cúbicos de agua, cuya fuente de abastecimiento principal es el agua de escorrentía superficial, seguida por agua lluvia en forma de precipitación, entendida esta última como la entrada principal de agua en el sistema cuenca.

La escorrentía aporta agua suplementaria al volumen final de agua en la obra, esta es mayor en el aporte, dado que es la sumatoria total de agua que escurre de diferentes puntos y que convergen en un punto común teniendo como destino final el embalse (obra de cosecha de agua) entre tanto el aporte de agua lluvia directo es menor. Del territorio, el 19.03% corresponde a la parte baja, el 41.43% para la parte media y el 39.52% para la parte alta. Estas secciones fueron determinadas utilizando el criterio de altitud (elevación), a partir del modelo de elevación digital y los sistemas de información geográfica Qgis versión 3.16. Este criterio no es el único para determinar las secciones de una cuenca-subcuenca o microcuenca, tal como lo indican Faustino y Jiménez (2002), que también se puede realizar mediante secciones de inclinación del terreno pendiente como se muestra en la Figura 24.

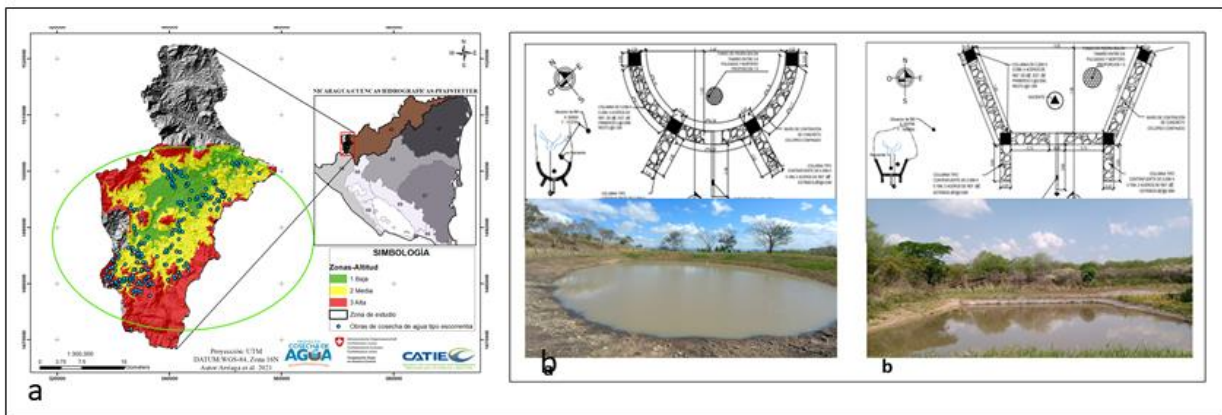


Figura 23. Distribución de las obras por sección topográfica en la subcuenca río Coco-Somoto

Cuadro 13. Distribución de obras por parte topográfica (alta, media, baja)

Zonas de la subcuenca	Número de obras	Porcentaje de distribución	Rango-Altitud (msnm)
Alta	80	33	851-1736
Media	92	38	674-851
Baja	69	28	552-674
Totales	236	100	

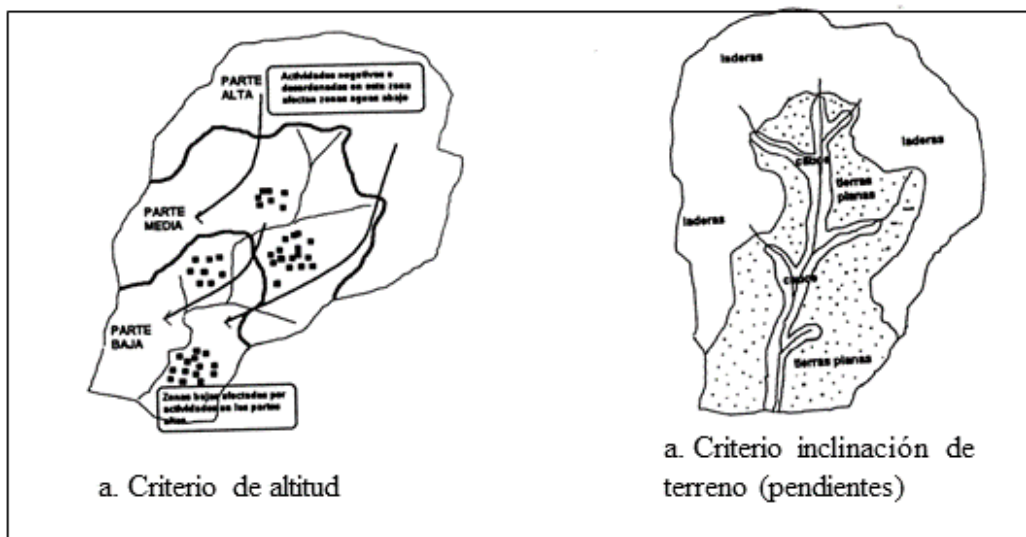


Figura 24. Criterios de zonificación de cuencas (Faustino y Jiménez 2000)

Del 100% de obras de cosecha de agua, el 6% (6 obras) se encuentra bajo el nivel de erosión de “alta a muy alta”, y el 94% (222 obras) se encuentran en niveles de erosión de “muy baja a baja a media” (Figura 25a). El 6% de las obras en niveles de erosión de “alta a muy alta” se encuentran en zonas con pendientes >25% y el 94% de las obras se encuentran en pendientes <25% (Figura 25b). La cantidad de sedimentos por erosión que potencialmente está llegando a cada obra es en promedio 0.14 toneladas métricas, dependiente del tipo de uso de suelo, grado de pendiente, tipo de suelo.

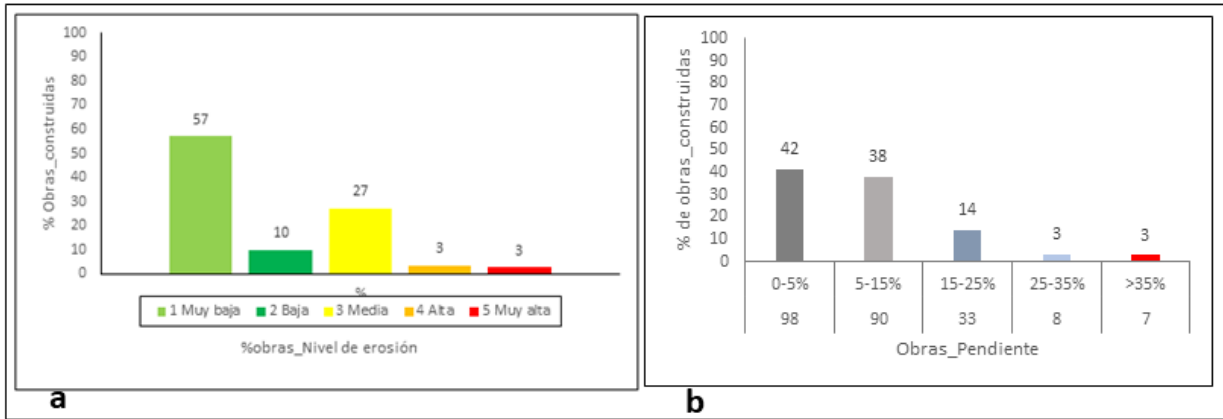


Figura 26. a. Categorías de erosión sobre las obras de cosecha de agua **Figura b.** Obras por porcentaje de pendiente

El 18.6% (44 obras) se ubican en zonas con usos de cultivos anuales (CORN), el 44.5 % (105 obras) se ubican en zonas bajo pasturas (PAST), el 32.6% (77 obras) se ubican en zonas bajo vegetación arbustiva (RNGB), el 3.4% (8 obras) en zonas de usos tacotal (SHRB) y el 0.8% (2 obras) en zonas de uso bosque latifoliado (FRSE) (Figura 26).

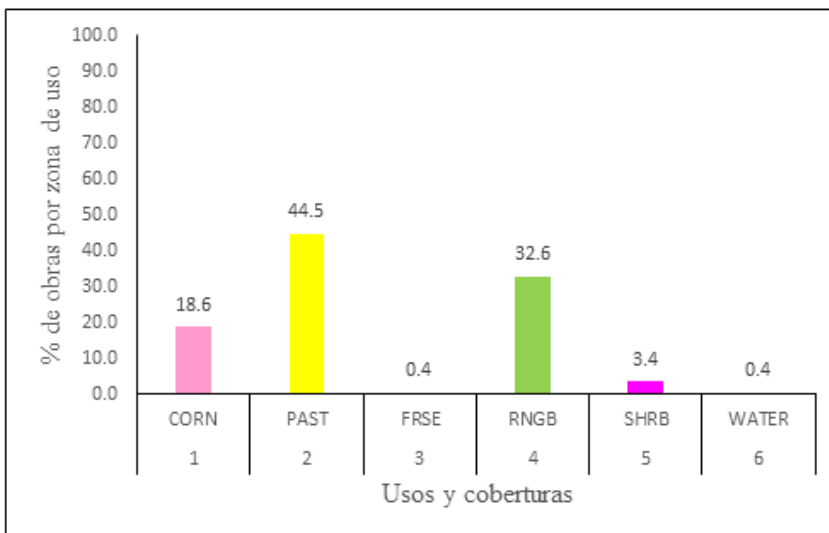


Figura 25. Porcentaje de obras por usos y cobertura de suelo

5.5. Propuesta de lineamiento para mitigar posibles impactos de sedimentación por erosión de suelos

5.5.1. Protección y conservación al recurso suelo

A pesar de que los cultivos agrícolas son las áreas con menor porcentaje de área, son los usos que más producción de sedimentos, esto se debe a que son áreas para cultivos de hortalizas y otras formas de cultivos, en donde las obras de conservación de suelos y agua están casi ausentes, y el

suelo esta descubierto (Figura 27a), lo que provoca daños a la corona y talud (Figura 27 b). Se propone masificar la siembra con cultivos en hileras, barreas vivas (zacate limón, valeriana, otras) y muertas respecto a la inclinación de pendientes, acequias de infiltración (Figura 27c), establecer trampas de retención de sedimentos en los diferentes cursos de agua en las zonas donde escurre el agua por escorrentía superficial.

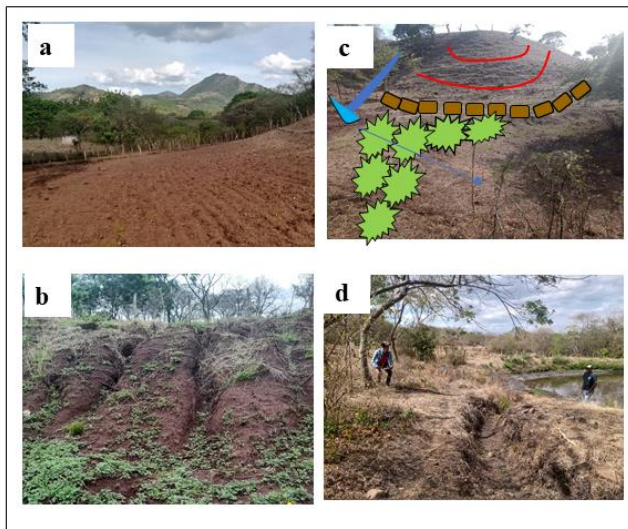


Figura 27. Acciones propuestas para conservar suelo y evitar erosión

5.5.2. Protección a las obras hidráulicas

Las obras representan una significativa inversión del proyecto como de los productores, se recomienda establecer acciones (siembra de pasturas o gramíneas forrajeras para proteger la corona y el talud (Figura 28c) y realizar cercas perimetrales para evitar la entrada de ganado a las obras (Figura 28a) para evitar daños mecánicos a la corona, para esto se proponen establecer bebederos bajo árboles para evitar evaporación de agua y satisfacer la demanda hídrica animal (Figura 28b).



Figura 28. Acciones de protección de las obras de cosecha de agua

6. Conclusiones

1- La identificación y ubicación espacial de los diferentes niveles de erosión presentes en la zona de interés, resulta de vital importancia, para focalizar y priorizar medidas de conservación de suelos y agua, que conlleven a reducir el riesgo de sedimentación y pérdida de la vida útil de las cosechadoras de agua en el tiempo.

2- De las evidencias anteriores, el porcentaje de cosechadoras de agua con mayor impacto potencial relacionado a la erosión hídrica y producción de sedimentos es relativamente bajo, no obstante, se debe poner especial interés en realizar acciones de conservación de suelos y agua, en las obras ubicadas en zonas de baja-media-alta erosión, dado que la dinámica de la erosión es muy variable en el espacio-tiempo, estas se pueden ver afectadas en el tiempo.

3- La distribución de usos y coberturas, grados de pendientes es muy variable en los estratos topográficos de la subcuenca, lo que determina que la erosión hídrica y producción de sedimentos varíe considerablemente.

4- El aporte de producción de sedimentos, está determinado por la dinámica de manejo de los usos y coberturas de suelo y no necesariamente por la cantidad de área, por ejemplo, los cultivos con menores áreas de distribución, aportan más producción de sedimentos comparado a otros usos y coberturas con mayores áreas de distribución y menores aportes de sedimentos.

5- El modelo hidrológico SWAT permite obtener valores referenciales de variables de interés (precipitación, erosión) que se relacionan a rangos estimados por otros autores para la zona de estudio, además permitió identificar la ubicación espacial de unidades hidrológicas más pequeñas de análisis (HRUs).

6- Realizar mediciones en campo (parcelas de esorrentía) y registros de variables climáticas a escala local, para realizar calibraciones al modelo en futuras investigaciones y comparar datos simulados versus observados.

7. Recomendaciones

1-Dado que SWAT, simuló los componentes del ciclo hidrológico, encontrando una relación cercana, a los reportados para esta zona por otras fuentes, para citar un caso la precipitación media se encontró entre los rangos reportados por INETER, FAO y Bendaña, por lo que se puede decir que la producción de sedimentos puede acercarse a valores con bajas incertidumbre; se recomienda realizar mediciones en campo (parcelas de escorrentía) y registros de variables climáticas a escala local para obtener datos in.istu, y realizar calibraciones al modelo en futuras investigaciones y comparar datos simulados versus observados.

2-Para reducir procesos de erosión de suelos en áreas bajo cultivos agrícolas sean estos de categoría perenne o anual, establecer cultivos en hileras a curva nivel, manejo de rastrojo, acequias de infiltración barreras vivas, muertas entre otras que se adapten a la zona y sobre todo que implique la menor inversión monetaria por parte de los productores para que sean sostenibles y de fácil adopción en el corto y mediano plazo.

3-En las áreas de la subcuenca identificadas con niveles altos de erosión, establecer parcelas de escorrentía superficial y pluviómetros para registros de eventos diarios y mensuales y con ello, calcular erosión in situ y analizar variables de forma controlada.

4-Establecer cartas de compromiso y/o entendimiento entre el proyecto y las familias beneficiarias con el objetivo de que estas se comprometan a establecer obras de conservación de suelos y agua en el año 1,2,3,4... sobre todo, en aquellas áreas que se han identificado con niveles de producción de erosión desde “Media a Alta y Muy Alta”, inclusive cuando sean zonas que no abarquen el radio de ubicación de sus obras de cosecha de agua.

8. Referencias bibliográficas

- Arnold, J; Srinivasan, R; Muttiah, S; Williams, J. (1988). Large area hidrologic modeling and assessment part 1: Model development. 34. s.l., s.e. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0899-9007\(00\)00483-4](https://doi.org/10.1016/S0899-9007(00)00483-4).
- Arroyo, L; Heidinger, H; Araya, E. 2010. Modelo Hidrológico SWAT como herramienta para procesos de toma de decisión. Documento Técnico N14. Area Evaluación de Tierras. :31.
- Ávalos, D; Cárdenas, G; Estrada, R; García, S; Garcia, J; Estrada, F. 2014. Aplicación del modelo SWAT para evaluar la contaminación por fuentes difusas en la subcuenca del lago de Chapala, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental* 30(3):263-274.
- Bendaña, G. 2018. Breve Caracterización de la Situación Agropecuaria e Hidrológica del Norte del Corredor Seco de Nicaragua. s.l., s.e., vol.118 (2). 188-213 p.
- Betrie, GD; Mohamed, YA; Van Griensven, A; Srinivasan, R. 2011. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. *Hydrology and Earth System Sciences* 15(3):807-818. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-15-807-2011>.
- Briak, H; Moussadek, R; Aboumaria, K; Mrabet, R. 2016. Assessing sediment yield in Kalaya gauged watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model (en línea). *International Soil and Water Conservation Research* 4(3):177-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.08.002>.
- Briak, H; Mrabet, R; Moussadek, R; Aboumaria, K. 2019. Use of a calibrated SWAT model to evaluate the effects of agricultural BMPs on sediments of the Kalaya river basin (North of Morocco) (en línea). *International Soil and Water Conservation Research* 7(2):176-183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.02.002>.
- Carvajal, D. 2017. Dinámica hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes en la subcuenca del río Tempisque, cuenca del Tempisque, Guanacaste, Costa Rica Tesis (en línea). s.l., CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 88 p. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A2242E/A2242E.PDF>.
- Castillo, L. ; Marin, J. 2011. Caracterización hidrológica e hidráulica y evaluación del transporte de sedimentos en regiones semiáridas (en línea). (1)(2007):1-21. Disponible en https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/congresos_nacionales/Caracterizacion_hidrologica-hidraulica_y_TS_IEA_2012.pdf.
- CATHALAC (Centro del Agua del Tropico Humedo para America Latina y el Caribe). 2018. manual teórico - práctico para determinar el caudal ambiental en las cuencas hidrográficas de los ríos chiriquí viejo (102) y chiriquí (108) y evaluación la disponibilidad hídrica (oferta y demanda hidrológica) en las cuencas hidrográficas de los ríos la. :84.
- Chen, J; Chang, H. 2021. Relative impacts of climate change and land cover change on streamflow using SWAT in the Clackamas River Watershed, USA. *Journal of Water and Climate Change* 12(5):1454-1470. DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.123>.
- Dile, Y; Srinivasan, R; Chris, G. (2019). QGIS Interface for SWAT (QSWAT) version 1.8: QSWAT+ Step by Step Setup for the Robit Watershed, Lake Tana basin Ethiopia. s.l., s.e.
- Estrada, C; Hernández, E; Guzmán, G; García, A. 2012. Evaluación de la erosión de suelos y de prácticas para conservarlos en la vertiente del Pacífico: Programa de Manejo Integrado de Cuencas, ICC. San Carlos, Guatemala, Universidad de San Carlos. p. 1.
- FAO. (2016). Corredor Seco América Central: Informe de Situación-Junio 2016 (en línea). Panamá, s.e. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-br092s.pdf>.

- Farzana, SZ; Zafar, MA; Shahariar, J Al. 2019. Application of SWAT Model for Assessing Water Availability in Surma River Basin. *Journal of the Civil Engineering Forum* 5(1):29. DOI: <https://doi.org/10.22146/jcef.39191>.
- Faustino, J; Jiménez, F. 2000. Manejo cuenca costarica.PDF (en línea). Turrialba, Costa Rica, s.e. p. 35. Disponible en http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr:8080/bitstream/11554/2946/1/Manejo_de_cuenclas_hidrograficas.pdf.
- Faustino, J. 1985. Conservacion de suelos: Proyecto regional de manejo de cuencas. Turrialba, Costa Rica, CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). p. 171.
- _____. 1986. Criterios para la clasificación y soluciones en la conservación de suelos y agua. s.l., s.e. 68 p.
- FEWS NET (Famine Early Warning SystemNetwork). (2020). Actualización de la perspectiva de seguridad alimentaria de monitoreo remoto: Eat e Iota. s.l., s.e.
- Gamboa, E. 2018. Producción De Agua Y Sedimento Actual Y Futuro a Partir De Cambios De Cobertura Forestal, Sector Prusia, Parque Nacional. s.l., Tecnológico de Costa Rica. 65 p.
- García, L; Veneros, J; Pucha-Cofrep, F; Chávez, S; Bustamante, DE; Calderón, MS; Morales, E; Oliva, M. 2021. Geospatial Analysis of Soil Erosion including Precipitation Scenarios in a Conservation Area of the Amazon Region in Peru. *Applied and Environmental Soil Science* 2021:1-21. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/5753942>.
- Girón, J. 2019. Distribución espacial d ela humedad del suelo y su relación con la cobertura vegetal en América Central, discrepancias dentro y fuera del corredor seco centroamericano. s.l., Universidad Rodrigo Facio. 123 p.
- Gourdjia, S; Läderachb, P; Martínez, A; Zelaya, C; Lobell, D. 2015. Historical climate trends, deforestation, and maize and bean yieldsin NicaraguaSharon Gourdji. s.l., s.e., vol.200. 270-281 p.
- Hernández, B; Cherrington, E; Garrish, V; Sempris, E. 2011. Mapa Centroamericana de cobertura y uso de la tierra: Cambios de cobertura y uso de la tierra 1980-1990-2000-2010. Technical report no. PREVDA/UGR/SER/14/18. s.l., s.e. 169 p. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16349.82409>.
- Hernandez, J;Velásquez, S; Jiménez , F; Rivera, S. 2003. Dinámica del uso de la tierra. *Recursos Naturales y Ambiente* (45):7.
- Hosseini, SH; Khaleghi, MR. 2020. Application of SWAT model and SWAT-CUP software in simulation and analysis of sediment uncertainty in arid and semi-arid watersheds (case study: the Zoshk–Abardeh watershed) (en línea). *Modeling Earth Systems and Environment* 6(4):2003-2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00846-2>.
- IDEAM (Instituto de Hidrologia; Metereologia y Estudios Ambientales). 2018. Protocolo De Modelación Hidrológica e Hidráulica. MARTÍNEZ, N; Quintero, J; BARRAGÁN, J; Urrego, J; Romero, C; Giraldo, M; Sarmiento, O; Quiroca, F (ed.). Bogota, Colombia, s.e. 59 p.
- Kroeger, T; Klemz, C; Boucher, T; Fisher, JRB; Acosta, E; Cavassani, AT; Denedy-Frank, PJ; Garbossa, L; Blainski, E; Santos, RC; Giberti, S; Petry, P; Shemie, D; Dacol, K. 2019. Returns on investment in watershed conservation: Application of a best practices analytical framework to the Rio Camboriú Water Producer program, Santa Catarina, Brazil (en línea). *Science of the Total Environment* 657(December 2018):1368-1381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.116>.
- Nachtergaele, F; Velthuisen, H; Verelst, L; Wiberg, D. 2012. Harmonized World Soil Database Version 1.2. Batjes, N; Dijkshoorn, K; Engelen, V; Fischer, G; Jones, A; Montanarella, L;

- Petri, M; Prieler, S; Texeira, E; Dhi, X (ed.). Roma, Italia, FAO (Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura). p. 50.
- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J. 2005. Herramienta de evaluación de suelo y agua documentación teórica (en línea). s.l., s.e. p. 415. Disponible en <http://swatmodel.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf>.
- Panduro, J. 2013. Comportamiento hidrológico en usos de la tierra, modelación de la erosión, y percepción de grupos de interés ante el proceso erosivo en la microcuenca del río Purires, Cartago, Costa Rica. s.l., CATIE (CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN). 108 p.
- Pusineri, G; Pedraza, R; Lozeco, C. 2005. Uso de modelos digitales de elevación y de sistemas de información geográfica en la modelación hidrológica. Geográfica digital:8. DOI: <https://doi.org/10.30972/geo.232664>.
- Quintero, M; Rivera, N. 2011. Aplicación Del Modelo Hidrológico Swat (Soil and Water Assessment Tool) a La Cuenca Del Río Cañete (Swat). Cali, Colombia, CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 35 p.
- Rafiei, V; Ghahramani, A; An-Vo, D; Mushtaq, S. 2020. Modelling Hydrological Processes and Identifying Soil Erosion Sources in a Tropical Catchment of the Great Barrier Reef Using SWAT. Water 12(8):26. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12082179>.
- Ríos, N; Ibrahim, M; Faustino, J. 2008. Uso del modelo SWAT para estimar la producción de sedimentos en una cuenca dominada por Ganadería. s.l., s.e. 761-765 p.
- Rivera, F; Pérez, S; Ibáñez, L; Hernández, F. 2012. Aplicabilidad del modelo swat para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. Agrociencia 46(2):101-105.
- Rodríguez, S. 2019. Análisis de sensibilidad en producción de agua y erosión hídrica bajo escenarios de cobertura vegetal y clima en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana. Turrialba, Costa Rica, CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 102 p.
- Santhi, C; Srinivasan, R; Arnold, JG; Williams, JR. (2006). A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas. 21. s.l., s.e. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.05.013>.
- Schuol, J; Abbaspour, C; Yang, H; Srinivasan, R; Alexander, J; Zehnder, B. 2008. Modeling blue and green water availability in Africa. Water Resources Research 44(7):1-18. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007WR006609>.
- Simón, X; Montero, M; Collado, O. 2020. Avanzando en la seguridad alimentaria mediante propuestas tecnológicas agroecológicas: La Aplicación del Método Biointensivo en el Corredor Seco de Nicaragua. Managua, Nicaragua, s.e. 33 p.
- Territoriales), I (Instituto N de E. (2021). Boletín climático de mes de Abril 2021. Managua, Nicaragua, s.e.
- Uribe, N. 2010. SWAT (Soil and Water Assessment Tool): Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. s.l., s.e. 1-47 p.
- Vigiak, O; Malagó, A; Bouraoui, F; Vanmaercke, M; Obreja, F; Poesen, J; Habersack, H; Fehér, J; Grošelj, S. 2017. Modelling sediment fluxes in the Danube River Basin with SWAT. Science of the Total Environment 599-600(December):992-1012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.236>.
- Vital, J; Castillo, R; Padrón, Y; Miranda, Y; Arevalo, N; Leroy, A. 2020. Integrated nuclear techniques for sedimentation assessment in Latin American region. International Soil and Water Conservation Research 8(4):406-409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.06.003>.

- Wang, C; Shan, L; Liu, X; Yang, Q; Cruse, RM; Liu, B; Li, R; Zhang, H; Pang, G. 2020. Impacts of horizontal resolution and downscaling on the USLE LS factor for different terrains (en línea). *International Soil and Water Conservation Research* 8(4):363-372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.08.001>.
- WGP (Programa Mundial de Alimentos). 2018. Evaluación inicial de seguridad alimentaria en emergencia Nicaragua. s.l., s.e. 31 p.
- Xiaojing, Ni; Parajuli, B, ying, O; Dash, P; Siegert, C; Dash, P; Siegert, C. 2021. Assessing land use change impact on stream discharge and stream water quality in an agricultural watershed (en línea). *Catena* 198(December 2019):105055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105055>.
- Yuan, L; Forshay, KJ. 2020. Using SWAT to evaluate streamflow and lake sediment loading in the xinjiang river basin with limited data. *Water (Switzerland)* 12(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/w12010039>.
- Zuleta, A. 2013. Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del río Pejibaye, Costa Rica (en línea). s.l., CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 79 p. Disponible en <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A11471e/A11471e.pdf>.
- Williams J. R.1975a Sediment-yield prediction with universal soil equation using runoff energy factor In:Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources,Oxford, pp. 244–252.

9. Anexos

Anexo 1. Estadísticos climáticos calculados para cada estación climática

Parámetro estadístico	Descripción	Unidad
TMPMX	Promedio mensual de la temperatura máxima diaria	(°C)
TMPMN	Promedio mensual de la temperatura mínima diaria	(°C)
TMPSTDMX	Desviación estándar mensual de la temperatura máxima diaria	(°C)
TMPSTDMN	Desviación estándar mensual de la temperatura mínima diaria	(°C)
PCPMM	Promedio mensual de la precipitación	(mmH ₂ O)
PCPSTD	Desviación estándar mensual de la precipitación diaria	(mmH ₂ O/día)
PCPSKW	Coefficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria	
PR_W1	Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día seco	
PR_W2	Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día húmedo	
PCPD	Promedio mensual del número de días lluvia	
RAINHHMX	Máxima lluvia de media hora por mes (mm H ₂ O)	(mmH ₂ O/día)
SOLARAV	Promedio mensual de la radiación solar diaria	(MJ/m ² /día)
DEWPT	Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío	(MJ/m ² /día)
WNDV	Promedio mensual de la velocidad de viento diaria	(m/s)

Nota: Los cálculos de los estadísticos de temperatura: TMPX, TMPMM, TMPSTDMX, TMPSTMN) se utilizó una hoja de Excel, y para el cálculo referidos a la precipitación PCPMM, PCPSTD, PCPSK, PR_W1, PR_W2, PCPD) se empleó el programa pcstat.exe de SWAT

Anexo 2.Nomenclatura de SWAT, de usos y coberturas

Nombre	Código de la planta	Origen de los valores de crecimiento de la planta	Tipo de planta
Agricultural generic	land-AGRL	Use values for grain sorghum	Warn season annual
Agricultural Row crops	land-AGR	Use values for corn	Warn season annual
Agricultural Close-grown	land-AGRC	Use values for Winter wheat	Trees
Orchard	ORCD	Use values for apples	Perennial
Hay	HAY	Use values for bermudagrass	Trees
Forest-mixed	FRST	Use values for Oak	Trees
Forest-deciduos	FRSD	Use values for Oak	Trees
Forest-evergreen	FRSE	Use values for Pine	Perennial
Wetlands	WETL	Use values for Alamo witchgrass	Perennial
Wetlands-forested	WETF	Use values for Oak	Perennial
Wetlandsnon-forested	WETN	Use values for Alamo witchgrass	Perennial
Pasture	PAST	Use values for Bermudagrass	Perennial
Summer pasture	SPAS	Use values for Bermudagrass	Perennial
Winter pasture	WPAS	Use values for Fescue	Perennial
Range-grasses	RNGE	Use values for little bluestem (LAI _{max} =2.5)	Perennial
Range-brush	RNGB	Use values for little bluestem (LAI _{max} =2.0)	Perennial
Range-southwestern US	SWRN	Use values for little bluestem (LAI _{max} =1.5)	Perennial
Water	WATR		Not applicable

Fuente: SWAT Input/Output File Documentation, Version 2012

Anexo 3.Clasificación de rangos de materia orgánica para Nicaragua-INETER

Característica	Clasificación	Nivel
Materia Orgánica	< 2	Muy Bajo
	2-3	Bajo
	3-4	Moderado
	>4	Alto

Fuente: Mapa INETER-2018

Anexo 4. Propiedades físico-químicas de las órdenes de suelo utilizadas para la zona de estudio

Propiedad físico-químicas	Unidad	Codigo- User_soil	Fuente
Densidad aparente de horizonte	(Mg/m ³ o g/cm ³)	SOL_BD1	A
Capacidad de agua disponible en el horizonte de suelo	(mm H ₂ O/mm suelo)	SOL_AWC1	A
Conductividad hidráulica saturada	(mm/hr)	SOL_K1	A
Textura	%	CL,C.SL	D
Factor de erodabilidad de suelo con datos de (textura y materia orgánica de los horizontes del suelo)		USLE_K1	B
Albedo del suelo en húmedo		SOL_ALB	B
Contenido de carbono orgánico		SOL_CBN	B
Grupo hidrológico, de tipo de suelo		HYDGRP	C
Número de horizonte del suelo		NLAYERS	D
Profundidad máxima de la raíz en el perfil de suelo	(cm)	SOL_ZMX	D
Profundidad máxima de la raíz en la superficie del suelo	(cm)	SOL_Z1	D
Contenido de arcillas en el suelo	%	SOL-CLAY	D
Contenido de limo en el suelo	%	SOL_SILT	D
Contenido de arena en % de suelo	%	SOL_SAND	D
USER_SOIL	excel		E
Porcentaje de roca en el suelo		SOL_CRK	
Fracción de porosidad		ANION_EXCEL	F

^a Software soil water characteristics SPA-USDA

^b Matriz de excel de KUSLE

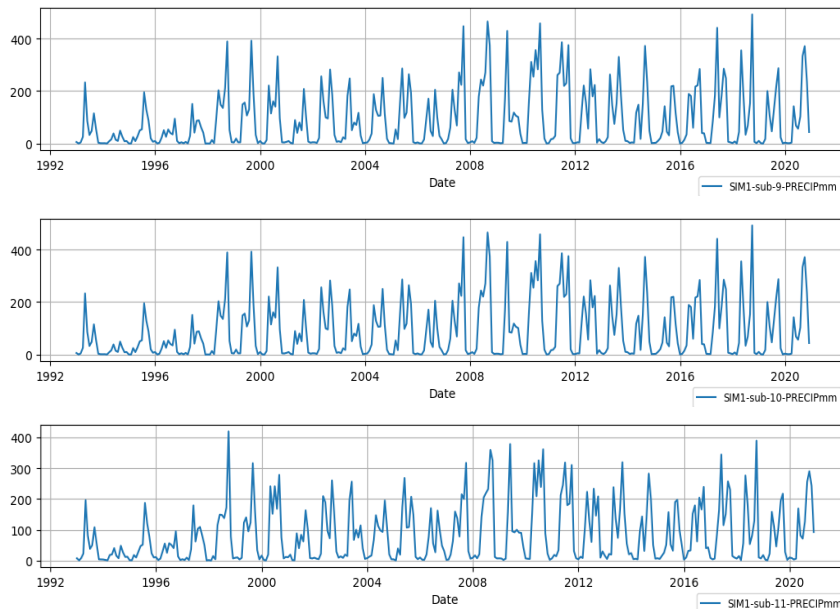
^c Programa N-Cur

^d Base de datos de suelos Armonizada para América Latina y el Caribe SOTERLAC versión 2.0

Anexo 5. Número de subcuencas elevaciones y distribución de área de superficie

Subcuenca	Max-elevación	Min-elevación	Área (ha)	% subcuenca	HRUS
1	881	552	643.0	1.07	19
2	1256	558	7431.9	12.3	41
3	638	590	49.9	0.08	26
4	1342	593	2304.2	3.8	38
5	994	601	814.8	1.3	51
6	1109	603	1658.5	2.7	56
7	643	620	9.97	0.02	16
8	807	561	85.9	0.1	11
9	1722	623	13602.4	22.5	46
10	1712	624	9215.5	15.3	70
11	1725	623	4671.7	7.9	74
12	1736	594	3785.3	6.2	61
13	1348	606	6301.1	10.4	74
14	1317	601	2338.3	3.8	36
15	1368	594	2088.7	3.4	39
16	1241	587	2553.9	4.4	35
17	1325	589	2496.8	4.1	35

Anexo 6. Comportamiento de la SURQ_{mm} de las subcuencas (9, 10, 11) con mayor aporte



Anexo 7. Comportamiento de precipitación de las subcuencas (9, 10, 11)

