

**ESTIMACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DIFUSA POR ACTIVIDADES
AGRÍCOLAS MEDIANTE EL MÉTODO HIDROLÓGICO SWAT EN LA
SUBCUENCA DEL RÍO LAS PIEDRAS.**



YINETH VIVIANA CAMACHO DE ANGULO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

INGENIERÍA FÍSICA

POPAYÁN

2018

**ESTIMACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DIFUSA POR ACTIVIDADES
AGRÍCOLAS MEDIANTE EL MÉTODO HIDROLÓGICO SWAT EN LA
SUBCUENCA DEL RÍO LAS PIEDRAS.**

YINETH VIVIANA CAMACHO DE ANGULO

**Trabajo en modalidad de investigación presentado como requisito para
optar al título de Ingeniera Física**

Director

Ing. EDGAR LEONAIRO PENCUE FIERRO

Codirectora

Biol. DIANA MARCELA RUIZ ORDÓÑEZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

INGENIERÍA FÍSICA

POPAYÁN

2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del director

Firma del codirector

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, 7 de noviembre de 2018.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida.

A mis padres, Alfonso y Mónica por su amor, apoyo, cariño, dedicación y por quienes, esto hoy es posible. A mi familia, por su compañía y por estar presentes en los buenos y malos momentos.

A la Universidad del Cauca, a los profesores del departamento de física y grupo de Óptica y Láser GOL, especialmente a Leonairo, Claudia, Willfrand y Mario por los conocimientos brindados, experiencias y vivencias dentro y fuera de clase. Al grupo de estudios ambientales GEA, en especial a Diana y a Juan Pablo por la oportunidad de trabajar con ellos y por el apoyo constante durante la realización del proyecto. A Julián, Cristian y Carlos por las asesorías y por su ayuda.

A la Fundación Pro Cuenca Río Las Piedras y a la división ambiental del Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A E.S.P por la información brindada para el desarrollo satisfactorio de este proyecto.

A mis compañeros de carrera, Ángela, Jessica, Francisco, Christian, Juan Felipe y Cristian por su compañía, horas de estudio y experiencias que ayudaron en mi crecimiento profesional y personal.

A mis amigos, especialmente a Juan Sebastián y a Cristhian por demostrarme que, aunque pasen los años están ahí y nos apoyaremos en los momentos buenos y no tan buenos. Gracias por todo lo compartido.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	10
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	13
1.3 OBJETIVOS.....	14
OBJETIVO GENERAL	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 MARCO TEÓRICO.....	15
2.1 PERCEPCIÓN REMOTA.....	15
2.2 PLATAFORMA SATELITAL SENTINEL 2A.....	15
2.3 CONTAMINACIÓN DIFUSA	16
2.4 MODELO HIDROLÓGICO “SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL” (SWAT).....	18
2.4.1 Características del modelo SWAT.....	19
2.4.2 Análisis a nivel de las unidades de respuesta hidrológica (HRU). 27	
2.5 ZONA DE ESTUDIO.....	28
3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	29
3.1 ORGANIZACIÓN DE BASE DE DATOS	29
3.1.1 Modelo digital de elevación – DEM.....	30
3.1.2 Mapa de tipo de suelos.	31
3.1.3 Mapa de uso de suelos.	32
3.1.4 Base de datos climatológicos.....	36
3.2 APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT.....	37
3.2.1 Delineación de la subcuenca y microcuencas.....	37
3.2.2 Creación y definición de las unidades de respuesta hidrológica – HRU.	40
3.2.3 Generador climático y tablas de datos meteorológicos.....	42

3.2.4	Simulación.....	42
3.2.5	Calibración y validación.....	43
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	44
4.1	ÁREA DE LA SUBCUENCA Y MICROCUENCAS DEFINIDAS	45
4.2	ANÁLISIS DE LAS UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA (HRU) 46	
4.3	SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA	50
4.4	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT.	57
4.5	GENERACIÓN DE ESCENARIOS	58
4.5.1	SEGUNDO ESCENARIO (E2).	59
4.5.2	TERCER ESCENARIO (E3).....	61
	CONCLUSIONES	65
	RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN .	67
	REFERENCIAS	68
	ANEXOS.....	71

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Resolución espectral Sentinel 2A.	16
Tabla 2. Grupos hidrológicos del suelo.	27
Tabla 3. Insumos requeridos para modelo hidrológico SWAT.	30
Tabla 4. Clasificación de coberturas Subcuenca Río Las Piedras.	35
Tabla 5. Estaciones en la Subcuenca del Río Las Piedras.	37
Tabla 6. Microcuencas definidas para la Subcuenca del Río Las Piedras.	39
Tabla 7. Unidades de suelo.	40
Tabla 8. Codificación de coberturas para SWAT.	40
Tabla 9. Rango de pendientes para SWAT.	40
Tabla 10. HRU distribuidas por sus componentes dominantes.	47
Tabla 11. Priorización de coberturas.	48
Tabla 12. Unidades de respuesta hidrológica priorizadas por unidad dominante.	50
Tabla 13. Resultados hidrológicos para la simulación 1999-2017.	51
Tabla 14. Visualización mapas.	52
Figura 15. Precipitación observada vs. Simulada.	57
Tabla 16. Parámetros con mayor influencia.	57
Tabla 17. Prácticas agrícolas.	59
Tabla 18. Modelos para evaluar la contaminación de fuentes agrícolas no localizadas.	71
Tabla 19. Datos estadísticos de estaciones Arrayanales y El Diviso.	75

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Funcionamiento general de SWAT.	20
Figura 2. Representación de ciclo hidrológico SWAT.	21
Figura 3. Componentes hidrológicos del modelo SWAT.	22
Figura 4. Transporte de pesticidas en SWAT.	27
Figura 5. Cuenca hidrográfica Río Las Piedras.	28
Figura 6. Esquema de trabajo.	29
Figura 7. Modelo de elevación digital DEM.	31
Figura 8. Mapa de tipo de suelos de la Subcuenca del Río Las Piedras.	32
Figura 9. Mapa de uso de suelos de la Subcuenca del Río Las Piedras.	33
Figura 10. Interfaz de descarga misión Copernicus.	33
Figura 11. Esquema de trabajo.	34
Figura 12. Polígonos de pastos naturales y pastos limpios.	36
Figura 13. Red hídrica Subcuenca del río Las Piedras.	38
Figura 14. Subcuenca del Río Las Piedras.	39
Figura 15. Unidades de respuesta hidrológica iniciales.	41
Figura 16. Unidades de respuesta hidrológicas.	42
Figura 18. Zonas priorizadas de cultivo y pastos limpios de la zona riparia en la Subcuenca Las Piedras.	44
Figura 19. Microcuencas de la subcuenca Río Las Piedras.	46
Figura 20. Representación esquemática de las HRU, subcuenca rio las Piedras.	47
Figura 21. Distribución de suelos dominantes según HRU priorizadas.	48
Figura 22. Distribución de HRU por tipo de cobertura.	49
Figura 23. Mapa de HRU ajustado a 241 unidades.	49
Figura 24. Resultados hidrológicos para la Subcuenca Río Las Piedras.	51
Figura 25. Ciclo del nitrógeno.	52
Figura 26. Nitrógeno orgánico por microcuenca.	53
Figura 27. Nitratos en escorrentía superficial por microcuenca.	53
Figura 28. Ciclo del fósforo.	54
Figura 29. Fósforo orgánico por microcuenca.	54
Figura 30. Pérdida de nutrientes.	56
Figura 31. Rendimiento de sedimentos.	56
Figura 32. Calibración de SWAT con caudal.	58
Figura 33. Agua disponible en el suelo para escenario II.	60
Figura 34. Rendimiento de sedimentos para escenario II.	60

Figura 35. Nitratos en escorrentía superficial para escenario II.....	61
Figura 36. Precipitación para escenario III.....	62
Figura 37. Escorrentía superficial.	62
Figura 38. Agua disponible en el suelo para escenario III.	63
Figura 39. Rendimiento de sedimentos para escenario III.....	63
Figura 40. Nitratos en escorrentía superficial para escenario III.	64
Figura 41. Calibración del modelo hidrológico SWAT.....	76
Figura 42. Contribución de la escorrentía superficial para escenario II.	77
Figura 43. Carga de nitrato en aguas subterráneas para escenario II.	77
Figura 44. Precipitación sin incremento.	78
Figura 45. Contribución de la escorrentía superficial para escenario III.	78
Figura 46. Carga de nitrato en aguas subterráneas para escenario III.....	79

RESUMEN

La investigación se realizó en la subcuenca del río Las Piedras, ubicada en los municipios de Popayán y Totoró, durante el periodo comprendido entre el año 1999 y 2017. Su propósito fue la estimación de la contaminación difusa por actividades agrícolas, en el periodo indicado, por lo que fue necesaria la priorización de las fuentes de contaminación no puntual asociadas a estas prácticas en las zonas aledañas al cauce principal y tributarios importantes del río Las Piedras; se simuló, calibró y validó el modelo hidrológico “*Soil and Water Assessment Tool*” (SWAT) y se analizaron las tendencias en procesos de contaminación difusa, según tres escenarios: La situación actual de la subcuenca, comprendida en el periodo 1999 – 2017, el segundo escenario teniendo en cuenta el incremento según prácticas tradicionales con uso de agroquímicos y el tercero, por incremento en la precipitación. El trabajo se justificó por la importancia de la gestión sostenible del agua destinada al consumo humano, dada la importancia que tiene esta subcuenca como principal fuente abastecedora de agua en el municipio de Popayán. Los insumos iniciales para la aplicación de SWAT fueron el mapa de elevación digital – DEM, los mapas de tipo y de uso de suelos y la base de datos climatológicos. Los resultados fueron: La definición de 18 microcuencas y de 607 unidades de respuesta hidrológica - HRU, la calibración del modelo para los años comprendidos entre 1999 – 2010, reportando un $R^2=0.614$, y la descripción de las condiciones de los escenarios propuestos. Concluyéndose que la contaminación difusa en la subcuenca, a partir de variables hidrológicas, nitratos, sedimentos, nitrógeno y fósforo, presenta una acumulación baja y que un posible escenario crítico se presentaría por incremento en las prácticas agrícolas y uso de agroinsumos.

Palabras clave: *Contaminación difusa, percepción remota, modelo hidrológico SWAT.*

1. INTRODUCCIÓN

En el planeta, los ecosistemas han sido degradados por la acción antrópica, afectando los recursos naturales y el clima. Esto, ha incidido en el desarrollo y bienestar de las comunidades locales a escala global (WI, 2013, 2015; Zuñiga, O., Uribe, A., Torres, A., Cuero, R., Peña, J., 2013). Al reconocer las complejas interacciones que ocurren en la biosfera, se hace evidente la creciente intervención de los ecosistemas a través de las actividades humanas, entre ellas se destaca la agricultura con la implementación de diferentes tecnologías que buscan mejorar la productividad y rentabilidad económica, acelerando la transformación del suelo para su uso en cultivos con el consecuente aumento de la erosión y la contaminación edáfica (Robinson, D. A., Hockley, N., Cooper, D. M., Emmett, B. A., Keith, A. M., Lebron, I., Reynolds, B., Tipping, E., Tye, A. M., Watts, C. W., Whalley, W. R., Black, H. I. J., Warren, G. P. y Robinson, 2013; Zuñiga, O., Uribe, A., Torres, A., Cuero, R., Peña, J., 2013).

En Colombia, las actividades agrícolas se concentran principalmente en la zona andina, estas son de gran importancia para el desarrollo socio-económico del país y están orientadas a la producción de grandes volúmenes de alimentos y materias primas. Consecuentemente, el manejo convencional que conjuga técnicas de labranza intensiva y el uso excesivo de agroquímicos durante el proceso de siembra, mantenimiento y cosecha en los cultivos establecidos en las laderas y valles andinos, han agudizado la deforestación, erosión, pérdida de fertilidad y desecación de suelos (Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S., Possingham, H., 2006).

En el departamento del Cauca, las actividades agrícolas presentan el manejo convencional expuesto anteriormente, situación que ha generado una sobreexplotación del suelo manifestándose en la pérdida de productividad, el incremento en el uso de agroquímicos, la aparición de enfermedades y, recientemente la exposición a la variabilidad y el cambio climático (GEA, GIT, CIAgua, 2013; GEA, 2012; Otero, J. D., Figueroa, A., Muñoz, F. A., Peña, 2011), situación que afecta el bienestar de las comunidades rurales caucanas y pone en riesgo el desarrollo de la actividad agrícola sostenible en el departamento.

En el 2017, la agricultura convencional generó aproximadamente 917.000 millones de pesos, que representaron el 11% del PIB departamental posicionándola en el cuarto renglón de importancia económica («Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Fomento Económico», s. f.); sin embargo, en comparación con el año 2007, la agricultura aportó cerca del 23% del PIB lo que indica un decrecimiento en la actividad agrícola que afecta la seguridad

alimentaria, el desarrollo sostenible y las condiciones socioeconómicas de la región (GEA, 2014). Debe reconocerse que la agricultura en el Cauca, tiene una amplia cobertura en términos sociales por la participación de las familias agricultoras en la economía departamental, ejemplos de ello son el café, la panela, el cacao, la quinua, entre otros. Por ello, es esencial la recuperación de las prácticas agrícolas sostenibles, dada su importancia socio-económica y ambiental para los caucanos.

En este contexto, en el presente estudio se aborda el análisis y la integración de datos de una cuenca representativa de la zona andina, en el departamento del Cauca, caso de estudio subcuenca del río Las Piedras, estimándose la contaminación difusa por actividades agrícolas en zonas de interés, mediante el procesamiento de imágenes satelitales y la implementación de un modelo hidrológico, como parte importante del estudio de variables características de las dinámicas de uso y degradación del suelo, y mejorar la planificación del proceso agrícola soportado en el conocimiento de las características locales, de manera que se adapten a las condiciones de cambio y variabilidad climática.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el desarrollo de las prácticas agrícolas se realizan actividades de limpieza, siembra, cosecha y mantenimiento tanto de cultivos como de suelos con fines productivos. Esto puede ocasionar problemas de deforestación de bosques naturales y contaminación de las fuentes hídricas, siendo crítico el incremento en las concentraciones de nitratos y fosfatos provenientes de residuos de abonos y pesticidas del suelo. De igual manera, se agudizan la erosión y la pérdida de fertilidad (Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S., Possingham, H., 2006; GEA, GIT, CIAgua, 2013; GEA, 2012).

En el departamento del Cauca, se resumen estas condiciones en torno a las actividades agrícolas, especialmente en las cuencas abastecedoras de las cabeceras municipales, como es el caso de la subcuenca río Las Piedras que abastece al municipio de Popayán. En Las Piedras, también declarada zona de interés ambiental, se desarrollan actividades económicas, como la agricultura a baja escala, la ganadería extensiva y la piscicultura («Acueducto y alcantarillado de Popayán – S.A.S E.P.S», s. f.); generando posibles focos de contaminación del agua a lo largo del cauce del río. En este sentido, los análisis que abordan los procesos de contaminación desde la dinámica de los suelos, cultivos y cauces, han sido poco abordados en el departamento y en la ciudad, algunos estudios incluyen el componente netamente hidrológico (Campaz, G., Enríquez, J., 2012), sin embargo, es importante integrar en el análisis las dinámicas

asociadas a los tipos de coberturas, sus efectos sobre la recarga de agua y los procesos de sedimentación, razón por la cual y en articulación con el proyecto “Análisis de vulnerabilidad e implementación de alertas tempranas para sistemas de abastecimiento de agua en el departamento del Cauca”, en este estudio se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el efecto de la contaminación difusa por actividades agrícolas en la subcuenca del río Las Piedras?

1.2 JUSTIFICACIÓN

Por la importancia de la subcuenca del río Las Piedras como fuente abastecedora del municipio de Popayán y la necesidad de contar con información útil para la gestión sostenible del agua destinada al consumo humano, es importante estimar la contaminación difusa en dicha subcuenca, para abordar la influencia sobre la calidad del agua de uno de los componentes socio-económicos más importantes en las cuencas andinas, la producción agrícola, en este sentido se identifican diferentes escenarios relacionados con la extensión de las prácticas agrícolas de las áreas productivas, permitiendo focalizar procesos de manejo y conservación de recursos hídricos a partir del conocimiento de los procesos de contaminación difusa.

De igual manera, estos resultados aportan a estudios de carácter ambiental, desde la perspectiva socio-económica a la sostenibilidad de las cuencas andinas como ecosistemas de importancia estratégica en la provisión de agua, restauración de bosques, así como la utilización productiva del territorio, formulación de estrategias de conservación ambiental y la generación de insumos cartográficos actualizados.

Este proyecto es un aporte a la articulación interinstitucional desde el alcance de los proyectos “Análisis de vulnerabilidad e implementación de alertas tempranas para sistemas de abastecimiento de agua en el departamento del Cauca” AQUARISC, en el componente de formación de doctorado e investigación, financiado por el fondo de Sistema General de Regalías SGR para los proyectos de CTI del núcleo ambiental del departamento del Cauca, “Red Interinstitucional de cambio climático y seguridad alimentaria” RICCLISA y las actividades de investigación que adelanta la Fundación río Las Piedras. De igual manera fortalece el trabajo investigativo y de cooperación académico de los grupos de investigación: Grupo de Óptica y Láser GOL y el Grupo de Estudios Ambientales GEA, de la universidad del Cauca.

1.3 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estimar la contaminación difusa por actividades agrícolas en la subcuenca del río Las Piedras, mediante modelación espacio-temporal.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Priorizar las fuentes de contaminación no puntual asociadas a las prácticas agrícolas en áreas aledañas al cauce principal de la subcuenca río Las Piedras, a partir de análisis espacial.
- Calibrar el modelo hidrológico SWAT teniendo en cuenta las actividades agrícolas, para evaluar la contaminación difusa en la subcuenca del río Las Piedras.
- Analizar las tendencias en los procesos de contaminación difusa por actividades agrícolas, teniendo en cuenta diferentes escenarios climáticos.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 PERCEPCIÓN REMOTA

La teledetección o percepción remota es una herramienta importante para obtener información de un objeto sin entrar en contacto directo con él, mediante sensores instalados en plataformas espaciales o plataformas aéreas. Para que esta observación sea posible, es necesario que aunque sin contacto material, exista una interacción entre el sensor y los objetos, la cual es el flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor (Chuvienco, E., 1995).

El principal objetivo de esta ciencia es analizar las condiciones que presenta el objeto de estudio al momento de la incidencia de la radiación electromagnética. La radiación reflejada por el objeto es captada por sensores montados en diversos tipos de plataformas (Chuvienco, E., 1995). Estos sensores son capaces de capturar la radiación y almacenarla en diferentes regiones del espectro, llamadas “bandas” o “canales”, donde cada uno posee una resolución espectral, espacial, radiométrica y temporal (Horning, N., 2018). En la actualidad hay diversas plataformas las cuales implementan sensores con algunas características, entre ellas tenemos los satélites LANDSAT, MODIS, SPOT, METEOSAT y SENTINEL.

2.2 PLATAFORMA SATELITAL SENTINEL 2A

El satélite Sentinel 2A forma parte de las misiones de la Agencia Espacial Europea ESA dentro de su programa espacial Copernicus. Se lanzó al espacio el 23 de julio de 2015 y su gemelo Sentinel 2B en 2016 en la misma órbita, pero con un desfase de 180° proporcionando alta frecuencia de revista (ESA, s. f.).

Los satélites llevan una cámara multispectral de alta resolución con 13 bandas espectrales (Tabla 1) que aportan una nueva perspectiva de la superficie terrestre y la vegetación, brindando información útil para las prácticas agrícolas y forestales, y para gestionar la seguridad alimentaria (Van der MeerH, F. D., van der WerffF, H. M. A., van Ruitenbeek, F. J. A., 2014).

Las imágenes de los satélites pueden ser empleadas para determinar varios índices vegetales, como el área con clorofila en la hoja y el contenido en agua, siendo de gran importancia para predecir la producción de las cosechas y aplicaciones relativas a la vegetación de la Tierra (Qunming, W., Peter M., 2018).

Tabla 1. Resolución espectral Sentinel 2A.

Banda	Resolución	Longitud de onda central	Descripción
B1	60m	443nm	Ultra azul (Costa y aerosol)
B2	10m	490nm	Azul
B3	10m	560nm	Verde
B4	10m	665nm	Rojo
B5	20m	705nm	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B6	20m	740nm	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B7	20m	783nm	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B8	10m	842nm	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B8a	20m	865nm	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)
B9	60m	940nm	Onda corta infrarroja (SWIR)
B10	60m	1375nm	Onda corta infrarroja (SWIR)
B11	20m	1610nm	Onda corta infrarroja (SWIR)
B12	20m	2190nm	Onda corta infrarroja (SWIR)

Fuente: Sentinel 2A – Resolución espacial

En la actualidad, gracias a la disponibilidad de imágenes satelitales y el desarrollo de nuevas y diferentes tecnologías son cada vez más los interesados en incorporar el uso de imágenes en proyectos que necesitan información y donde la sensibilidad de los sensores pueden aportar información que no es visible para el ojo humano, o de regiones no visibles del espectro electromagnético, resultando ventajoso para un gran número de aplicaciones dentro de la agricultura, el medio ambiente, actualización de bases de datos cartográficas, manejo de riesgos de origen natural, prospección geológica, minera y recursos naturales, entre otros.

En este sentido, la teledetección se usa para el análisis de la calidad del agua en cuencas hidrográficas y uno de los enfoques de este análisis es el de contaminación difusa. El estudio de los procesos de contaminación hídrica procedente de fuentes no localizadas, permite comprender el efecto de las actividades agrícolas, las cuales no tienen un punto fijo o claro de ingreso en los cauces de los ríos aledaños, y afectan desde diferentes fuentes como áreas agrícolas. Las fuentes no puntuales son responsables de al menos la mitad de toda la contaminación del agua y son los contribuyentes más importantes de materiales; tales como sedimentos, nutrientes, bacterias patógenas, plaguicidas, lluvia ácida y bifenilos policlorinados. (Dominguez de Franco, V., 2009).

2.3 CONTAMINACIÓN DIFUSA

La contaminación de las aguas procedente de fuentes no localizadas, conocida con el nombre de contaminación difusa, es resultado de un amplio grupo de actividades en las que los contaminantes no tienen un punto claro de ingreso en

los cursos de agua que los reciben («Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO)», 2006), depende de las acciones humanas en sus predios y cultivos, así como del espacio geográfico de la cuenca que determinan el flujo de los contaminantes por factores como la escorrentía, topografía (relieve y pendiente), capacidad de infiltración de los suelos, tipo de suelo, densidad y cobertura vegetal (Gonzales, S., 2007), la temperatura y precipitación. La contaminación difusa no es un fenómeno reciente, sin embargo, el interés en conocer sus efectos sobre la calidad del agua se ha ido incrementando en los últimos años debido a la relación socio-económica que implica en los procesos de gestión y manejo de los recursos naturales y los ecosistemas estratégicos como las cuencas hidrográficas. Hace unos treinta años aproximadamente, se relacionaban eventos de escorrentía de plaguicidas con la muerte de peces, comenzando de este modo una serie de estudios de campo y esfuerzos predictivos dirigidos a una mayor comprensión y prevención de la contaminación difusa (Aguilar, C., 2004). Más recientemente se ha dedicado mayor atención al papel desempeñado por el nitrógeno, fósforo, demanda de oxígeno, ciertas especies de microorganismos y otros materiales en la contaminación difusa. Esta mayor atención coincide con el éxito obtenido en la reducción de las entradas puntuales de contaminantes a las aguas receptoras (Aguilar, C., 2004).

La cuantificación de los efectos sobre la calidad del agua es difícil a nivel de cuenca; sin embargo, es de gran importancia para los responsables de la elaboración de políticas para el manejo de los recursos de agua y para sus usuarios (Dominguez de Franco, V., 2009).

Caracterizar y cuantificar las fuentes de contaminación de una cuenca puede proporcionar información sobre la magnitud e influencia relativa de cada fuente y su impacto sobre las condiciones de la calidad del agua. Los modelos de simulación de contaminación difusa sirven para representar la producción y el transporte de contaminantes desde su lugar de origen en la superficie del suelo hasta la red hidrológica. Estos modelos se usan generalmente para evaluar el impacto de las prácticas agrícolas sobre la calidad del agua y lograr identificar los sectores de contaminación en la cuenca (Novotny, V., 1986).

Actualmente los modelos de simulación son las mejores herramientas en lo que respecta a la cuantificación de las cargas y concentraciones de contaminantes a escala de cuenca (Dominguez de Franco, V., 2009). Los modelos de simulación de fuentes de contaminación no puntual o difusa más reconocidos a nivel mundial se presentan en el

ANEXO 1.

2.4 MODELO HIDROLÓGICO “SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL” (SWAT)¹

La herramienta de evaluación del suelo y agua (SWAT, por sus siglas en inglés “Soil and Water Assessment Tool”) es un modelo dinámico continuo basado en descripciones matemáticas de procesos físicos, hidroquímicos y biogeoquímicos que combina elementos de naturaleza física y conceptual semi-empírica y que también incluye un esquema de disgregación espacial o unidades de respuesta hidrológica (HRUs). Este modelo se desarrolló por el Centro de Investigación Blackland en Texas, por el Dr. Jeff Arnold en el año 1999, para el departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

Es un modelo avalado por su amplia aplicación a cuencas y fue estructurado para hacer replicas en hidrología, clima y crecimiento de plantas, realizar una evaluación del impacto de las actividades agropecuarias y centros urbanos en la producción del agua y las pérdidas de nutrientes y sedimentos por erosión y el uso de agroquímicos en las cuencas hidrográficas, incluyendo distintos usos, prácticas de manejo y gestión con una visión a largo plazo (Bautista, D., 2013).

El objetivo del modelo es predecir el impacto del manejo del agua, sedimentos y carga de químicos agrícolas en grandes cuencas sin estaciones de monitoreo (Urrutia Rivas, M. A., 2016), para satisfacer este objetivo el modelo presenta las siguientes características:

- Se basa en procesos físicos (su calibración no es posible en microcuencas sin estaciones de monitoreo).
- Es eficiente desde el punto de vista computacional para operar grandes cuencas en un tiempo razonable.
- Es continuo y capaz de simular largos periodos para evaluar los efectos de cambio en el manejo del agua, sedimentos y cargas químicas agrícolas.

El modelo ofrece los siguientes beneficios:

- Se pueden simular las cuencas sin datos de control (escurrimientos máximos).
- El impacto relativo de los datos de entrada alternativos (variaciones en prácticas del manejo, clima, vegetación, etc.), u otras variables de interés pueden ser cuantificados.
- La simulación de cuencas muy grandes o una variedad de estrategias de manejo, se pueden realizar sin invertir demasiado tiempo o dinero, lo que hace a este modelo computacionalmente eficiente.

¹ SWAT2012 Input/output File Documentation

- Permite el estudio de impactos a largo plazo. Generalmente muchos de los problemas examinados por el usuario incluyen la incorporación gradual de contaminantes y el impacto en cuerpos de agua rio abajo.

2.4.1 Características del modelo SWAT.

SWAT modela de forma integral la cuenca y su dinámica en función de diferentes escenarios actuales y futuros, mediante la aplicación de un modelo determinístico semidistribuido y es útil con fines de planificación debido a que vincula en los escenarios de análisis diferentes componentes del territorio como el cambio de uso del suelo, las actividades de reforestación, centros poblados, obras de captación entre otros.

En general el funcionamiento del SWAT es como se indica en la Figura 1.

Está basado en la ecuación de balance hídrico para determinar los flujos de entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca y determinar su respuesta hídrica. La ecuación básica es:

$$SW_t = SW_0 + \sum R_{day} - Q_{surf} - E_a - wseep - Q_{gw}$$

Donde:

- SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm)
- SW_0 es el contenido de humedad en un día i (mm)
- t es el tiempo (días)
- R_{day} es la precipitación diaria del día i (mm)
- Q_{surf} es el producido de escorrentía superficial del día i (mm)
- E_a es la evaporación del día i (mm)
- $wseep$ es el contenido entrante en la zona vadosa del suelo en el día i (mm)
- Q_{gw} es el caudal producido o retornado del día i (mm)

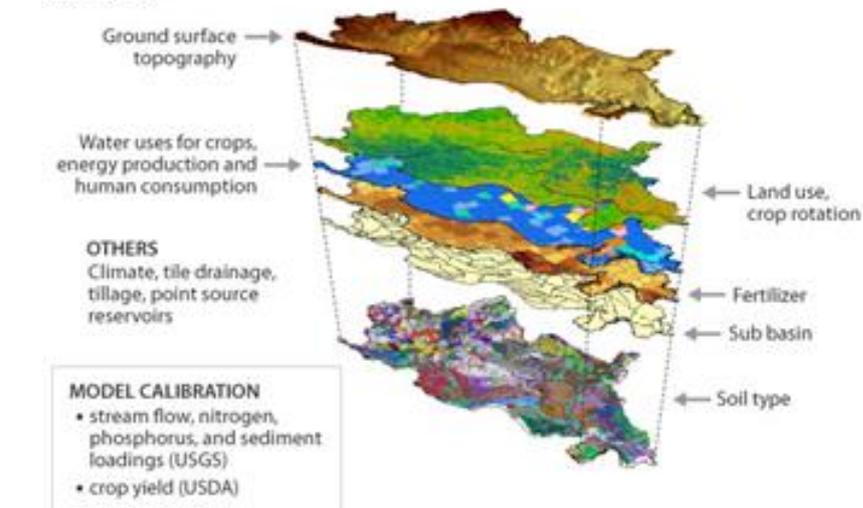
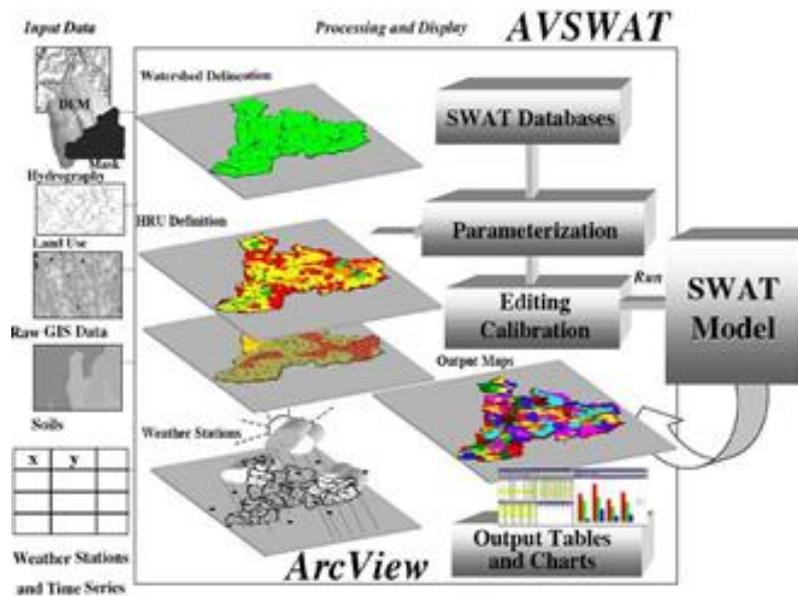


Figura 1. Funcionamiento general de SWAT. Fuente: <http://swat.tamu.edu/>

La simulación hidrológica de la cuenca tiene en cuenta la fase terrestre del ciclo hidrológico (Figura 2), esta fase controla la cantidad de sedimentos, agua, las cargas de alimento nutritivo y pesticida al canal principal en la subcuenca y la fase de transporte, la cual define el movimiento del agua, sedimentos, entre otros a través de la red de canales de la cuenca hacia el vertedero.

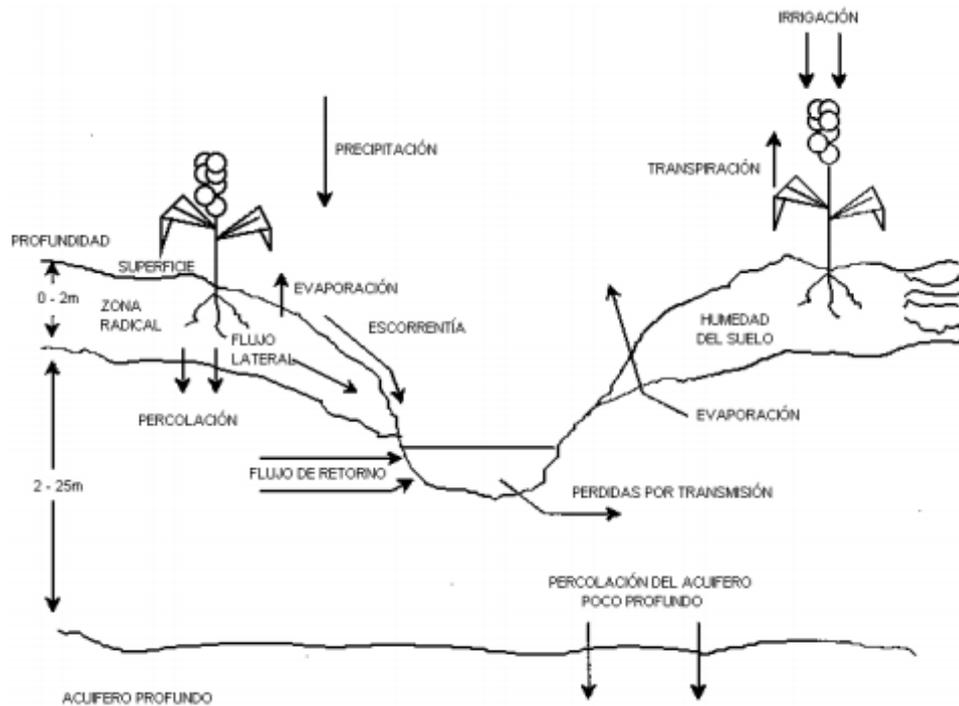


Figura 2. Representación de ciclo hidrológico SWAT. Fuente: SWAT User's Manual, 2000.

Los componentes del modelo se agrupan en ocho divisiones: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos.

2.4.1.1 Hidrología: Cuando la precipitación desciende, puede ser interceptada y puede ser contenida en el dosel de la vegetación o cae a la superficie del suelo. El agua en la superficie del suelo se infiltra en el perfil de la tierra o fluiría sobre el terreno como escorrentía. La escorrentía se mueve relativamente rápido hacia un canal de corriente y contribuye en un corto plazo en la corriente. El agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar lentamente al sistema de agua – superficie, a través de pasos subterráneos. Las conductas potenciales de movimiento de agua simulada por SWAT en las unidades de respuesta hidrológica son ilustradas en la Figura 3.

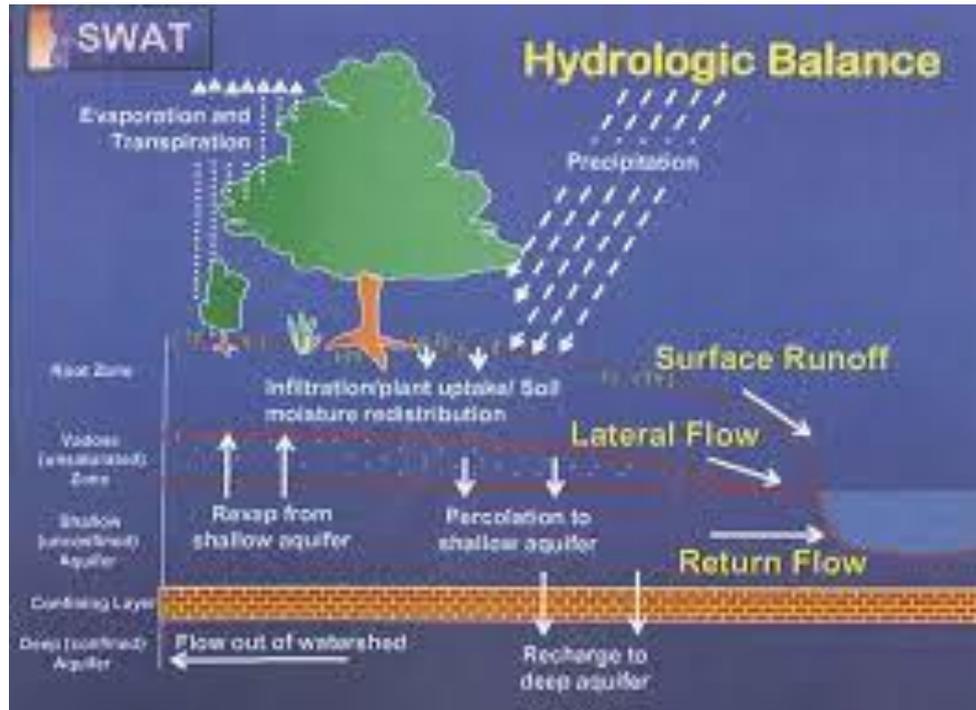


Figura 3. Componentes hidrológicos del modelo SWAT. Fuente: SWAT User's Manual, 2000.

Escurrimiento superficial.

El modelo simula los escurrimientos y los caudales máximos, que se producen por la lluvia diaria. El volumen de escurrimiento se estima con la técnica modificada método del número de curva CN, propuestas por el servicio de conservación del suelo (SCS) (USDA SCS, 1972) o el método de infiltración de Green & Ampt. En el método CN, la curva varía de forma no linealmente con el contenido de humedad del suelo. La curva numérica baja si la tierra se acerca al punto de marchitez permanente y aumenta hasta cerca de 100 al acercarse el suelo a la saturación.

El método de Green & Ampt requiere los datos subsidiarios de precipitación y calcula la infiltración como una función del frente potencial métrico húmedo anterior y conductividad hidráulica efectiva. El agua que no se infiltra se convierte en escorrentía de la superficie.

Percolación.

El componente de percolación del SWAT usa una técnica de almacenamiento que predice el flujo a través de cada capa de suelo en la zona de raíces. El flujo hacia abajo ocurre cuando se excede la capacidad de campo (CC) de una capa de suelo y si la capa inferior no está saturada. La tasa de flujo hacia abajo está

gobernada por la conductividad de saturación en la capa del suelo. El flujo hacia arriba puede ocurrir cuando una capa inferior excede la CC. El movimiento de agua de una capa inferior hacia una capa superior adyacente se regula por el coeficiente de agua del suelo a CC de las dos capas. La percolación también es afectada por la temperatura del suelo.

Flujo lateral subsuperficial.

El flujo lateral subsuperficial en el perfil de suelo (0-2 m) se calcula simultáneamente con la percolación. Se usa un modelo cinemático de almacenamiento para poder predecir el flujo lateral en cada capa de suelo. El modelo considera la variación en la conductividad, la pendiente y el contenido en el suelo.

Flujo de agua subterráneo.

La contribución del flujo subterráneo al flujo total se simula creando un acuífero de almacenamiento poco profundo, la percolación a partir de la parte baja de la zona de raíces es una recarga para ese acuífero delgado. Un constante de recesión derivada a partir de datos diarios de flujo se usa para retornar el flujo del acuífero a la corriente de agua. Otros componentes incluyen evaporación, bombeo y filtraciones hacia la profundidad del acuífero.

Evapotranspiración.

El modelo ofrece tres opciones para su estimación: Hargreaves, Priestley Taylor, and Penman – Monteith. El método de Penman requiere de la radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento. Si los valores diarios de las variables anteriormente mencionadas no están disponibles pueden ser generados a partir de valores mensuales. Los métodos de Hargreaves y de Priestley Taylor dan resultados realistas en la mayoría de los casos. Los métodos calculan la evapotranspiración de suelos y de las plantas separadamente. La evapotranspiración potencial del agua en el suelo se estima en función de la evapotranspiración y el índice de área foliar (el área de las hojas de una planta en relación al área del suelo m^2/m^2). La evapotranspiración del suelo real se estima usando ecuaciones exponenciales de la profundidad del suelo. La evapotranspiración del agua en la planta se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial y el índice de área foliar.

Clima.

Las variables climáticas empleadas en el modelo SWAT son: precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si

la precipitación diaria y las temperaturas máximas y mínimas no están disponibles, el generador climático puede simular las temperaturas y la lluvia diarias. La radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa son siempre simuladas. Un conjunto de variables climáticas puede ser simuladas para toda la cuenca o diferente clima puede ser también simulado para cada subcuenca.

Precipitación.

El modelo de precipitación SWAT desarrollado por Nicks (1974) es un modelo de cadena de primer orden, por lo tanto, las entradas al modelo deben incluir las probabilidades mensuales de recibir precipitación si el día anterior fue seco o húmedo. Dada la relación húmedo – seco, el modelo determina estocásticamente si ocurre o no precipitación. Cuando un evento de precipitación ocurre, la lámina se calcula a partir de la generación de una distribución de la precipitación diaria. La cantidad de la precipitación diaria se reparte entre la lluvia y la nieve usando la temperatura diaria promedio del aire.

Temperatura del aire y radiación solar.

La temperatura de aire máxima y mínima, así como la radiación solar se genera a partir de una distribución normal corregida por las probabilidades húmedo – seco. El factor de corrección se usa para dar mayor desviación a la temperatura y radiación cuando el clima cambia y para días lluviosos. De esta manera las desviaciones son menores en días secos. Los factores de corrección se calculan para asegurar que las desviaciones estándar a lo largo de variables diarias se mantengan.

Velocidad del viento y humedad relativa.

La velocidad del viento diaria se simula usando una ecuación especial, ya que la velocidad mensual media del viento es un factor de entrada. El modelo de humedad relativa simula promedios diarios a partir de promedios mensuales utilizando una distribución triangular, igual que con la temperatura, la radiación y la humedad relativa media diaria se ajusta para tomar en cuenta los efectos de días húmedos y secos.

2.4.1.2 Sedimentación: La sedimentación es el proceso natural por el que las partículas pesadas del agua se encuentran en suspensión y son transportadas por distintos agentes como escorrentía, viento o glaciares. Puede ser benéfico, cuando se refiere al tratamiento del agua, o perjudicial, cuando se piensa en la reducción de la capacidad de un canal de drenaje (Perez, L.E., 2005).

Producción de sedimentos.

La producción de sedimentos se estima para cada subcuenca con la ecuación universal de pérdida de suelo modificada. El modelo hidrológico provee la estimación del volumen de escurrimiento y la tasa de escurrimiento pico. El factor de manejo de los cultivos se evalúa como la biomasa aérea, el residuo de cosecha en la superficie y el valor mínimo del factor C para el cultivo.

Temperatura del suelo.

Los promedios diarios de la temperatura del suelo se simulan para el centro de cada capa de suelo para usarse en la hidrología y la degradación del residuo. La temperatura de la superficie del suelo se estima usando la temperatura diaria del aire máximo y mínimo y la cantidad de nieve, planta y cobertura de residuos para el día de interés más los cuatro días inmediatos anteriores. La temperatura del suelo se simula para cada capa usando una función de profundidad, temperatura superficial y temperatura media anual del aire, donde la profundidad depende de la densidad aparente del suelo.

Nutrientes.

SWAT rastrea el movimiento y transformación de las diversas formas de nitrógeno y fósforo en las cuencas. En el suelo la transformación de nitrógeno de una forma u otra es regida por ciclo del nitrógeno. La transformación del fósforo en el suelo es controlada por el ciclo del fósforo. Los nutrientes pueden ser introducidos a los canales principales y transportados río abajo por escorrentía y flujo superficial o subterráneo lateral.

Nitrógeno.

El uso de nitrógeno por las plantas se estima utilizando el enfoque de oferta y demandas requerido en el crecimiento de plantas. Adicionalmente al uso de las plantas, el nitrato y el nitrógeno (N) orgánico pueden ser removidos de la tierra a través del flujo masivo del agua. Las cantidades de NO_3 -N contenidos en las escorrentías, flujo lateral y filtración son estimadas como productos del volumen de agua y la concentración de nitrato en la capa. El transporte del N orgánico

con sedimento, es calculado, con una función de la carga desarrollada por McElroy, M.B., Kong, Y.L., Nier, A.O., 1977 y modificado por William y Hann (1978) para la aplicación a acontecimientos individuales de escorrentías. La función de la carga estima la pérdida diaria de escorrentía del nitrógeno orgánico basada en la concentración de N orgánico en la primera capa de suelo, en la producción de sedimento y en la producción de enriquecimiento. La proporción del enriquecimiento es la concentración del nitrógeno orgánico en el sedimento dividido por el suelo.

Fósforo.

El uso del fósforo (P) por las plantas se estima utilizando el enfoque de oferta y demanda requerido en el crecimiento de plantas. Adicionalmente el uso por las plantas del fosforo soluble y orgánico pueden ser removidos de la misma tierra a través del flujo masivo de agua. El fosforo no es un nutriente móvil y la interacción entre escorrentía de superficie con solución P en los primeros 10 mm de suelos no serán completos. La cantidad de P soluble removido en las escorrentías se predice utilizando la concentración de solución oxígeno en los primeros 10 mm de suelo, el volumen de escorrentía más un factor de división.

Pesticidas.

SWAT simula el movimiento de pesticidas en la red de corrientes a través de la escorrentía superficial (en solución y absorción al sedimento transportado por las escorrentías), hacia el perfil del suelo y acuíferos por filtración (en la solución). Las ecuaciones usadas para modelar el movimiento del pesticida en la fase de suelo del ciclo hidrológico fueron adaptadas de GLEAMS (Leonard, R.A., Knisel, W.G., Still, D.A., 1987). El movimiento del pesticida es controlado por su solubilidad, degradación de media – vida y coeficiente de absorción de carbón orgánico en el suelo. El pesticida en el follaje de la planta y en el suelo se degrada de manera exponencial según la media – vida apropiada. El transporte del pesticida por el agua y sedimento se calcula para cada acontecimiento de escorrentía y se estima para cada capa de suelo cuando ocurre filtración.

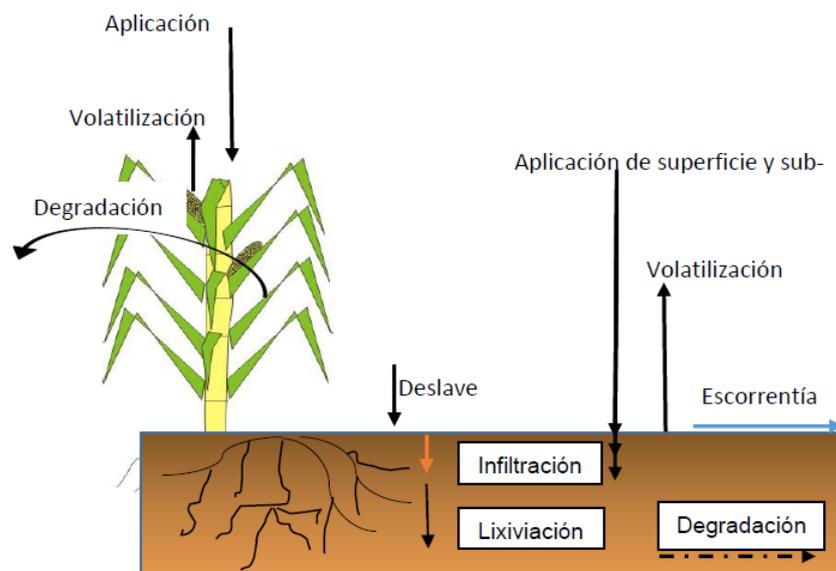


Figura 4. Transporte de pesticidas en SWAT. Fuente: SWAT User's Manual, 2010.

2.4.2 Análisis a nivel de las unidades de respuesta hidrológica (HRU).

Las unidades de respuesta hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés) son las áreas específicas dentro de la cuenca que identifica el modelo a partir de las posibles combinaciones entre los atributos del tipo de suelo, uso del suelo, pendientes y procesos de gestión (Hernandez, D., 2015). Son importantes porque permiten identificar las áreas críticas susceptibles de procesos de contaminación por exceso de nutrientes provenientes de los cultivos en suelos aledaños al cauce.

Dependiendo del objetivo de estudio se pueden crear HRU de diferentes tipos: características topográficas, caudal, erosión, coberturas, recarga y almacenamiento.

En la identificación de las HRU son importantes algunos factores incidentes en la producción de sedimentos como el grupo hidrológico, debido a que determinan la velocidad de infiltración, permeabilidad y escorrentía (especialmente crítica en el tipo D).

Tabla 2. Grupos hidrológicos del suelo.

Grupo hidrológico	Textura	Velocidad de infiltración	Permeabilidad	Escorrentía
A	Arenosa areno-limosa	7.62-11.43	Alta	Mínima
B	Franca-arenosa, franca, franco-arcillo-arenosa	3.81-7.62	Moderada	Moderada
C	Franco-arcillosa, franco- arcillo-limosa	1.27-3.81	Mínima	Moderada
D	Arcillosa	0-1.27	Mínima	Alta

Fuente: US soil conservation.

2.5 ZONA DE ESTUDIO

La subcuenca del río Las Piedras está ubicada en los municipios de Popayán y Totoró. Se encuentra a $76^{\circ}31'10''$ al oeste de Greenwich y $2^{\circ}21'45''$ de latitud Norte. Limita al norte con la divisoria de aguas de la cuenca del río Palacé, al sur con el río Vinagre, al este con los cerros de Puzná y Cargachiquillo, al oeste con el río Cauca (Acueducto y alcantarillado de Popayán S.A, 2018).

Hace parte de la macrocuenca del río Cauca, zona alta, en el departamento del Cauca. Su extensión es de aproximadamente 6.626Ha, la temperatura varía de 10.4°C en el área superior a 18.4°C en el área inferior. Las zonas climáticas son típicamente frías y templadas (1980 a 3820 msnm) (Ruiz, D. M., Martínez, J. P., Otero, J. D., Figueroa, A., 2017). La cuenca comprende dos corregimientos: Quintana y Las Piedras; existen comunidades campesinas e indígenas pertenecientes a los cabildos de Quintana y Puracé.



Figura 5. Cuenca hidrográfica Río Las Piedras. Fuente: Propia.

3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En respuesta a los objetivos específicos planteados, la metodología propuesta comprende:

1. Organización de base de datos climatológica, unidades cartográficas (fisiografía) y coberturas vegetales.
2. Aplicación del modelo hidrológico SWAT.
3. Simulación de escenarios.
4. Análisis de resultados obtenidos.

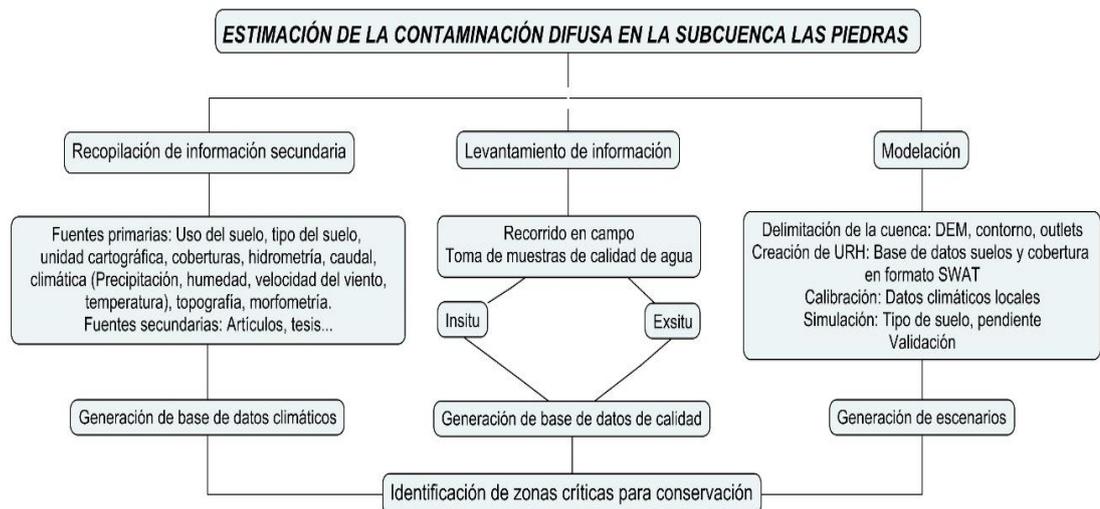


Figura 6. Esquema de trabajo. Fuente: Propia.

A continuación, se presenta en detalle la recopilación de la información secundaria, y adecuación de la información disponible y que es necesaria para aplicar el modelo.

3.1 ORGANIZACIÓN DE BASE DE DATOS

La organización de la base de datos consta de la adquisición y organización de la información necesaria que corresponda a las entradas del modelo hidrológico SWAT, y la adecuación de esta información según los intereses y alcances del presente estudio. La aplicación del modelo requiere principalmente:

Tabla 3. Insumos requeridos para modelo hidrológico SWAT.

DATOS DE ENTRADA	FORMATO
DEM	Raster .tif ²
Mapa edafológico (Fisiografía)	Raster .tif
Uso de suelo (Coberturas)	Raster .tif
Características fisicoquímicas de suelo	.dbf ³
Estaciones de monitoreo (pluviométrica, limnimétrica)	Coordenadas .dbf
Precipitación diaria	.txt ⁴
Temperatura diaria (mínima - máxima)	.txt
Velocidad del viento*	.dbf
Humedad relativa*	.dbf
Caudal	.dbf
Prácticas agrícolas	.dbf
Calidad del agua	.dbf

*Pueden completarse en SWAT

Fuente: Propia.

3.1.1 Modelo digital de elevación – DEM.

Para la topografía se utilizó un modelo digital de elevación – DEM con precisión de 12.5 m (Tamaño de celda 12.5×12.5) en formato tif, como se observa en la Figura 7, el cual se obtuvo de la página web Alaska Satellite Facility⁵ (NASA, s. f.). A partir de este insumo, se obtuvo la delineación de la cuenca, las microcuencas y la red de drenaje.

² Tif: Formato de archivo informático para almacenar imágenes de mapas de bits.

³ Dbf: Formato de archivo de datos utilizado en el sistema de gestión de base de datos, esta extensión se puede abrir con Microsoft Access Database.

⁴ Txt: Archivo informático que contiene texto formado solo por caracteres que son legibles por humanos.

⁵ Alaska Satellite Facility: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>

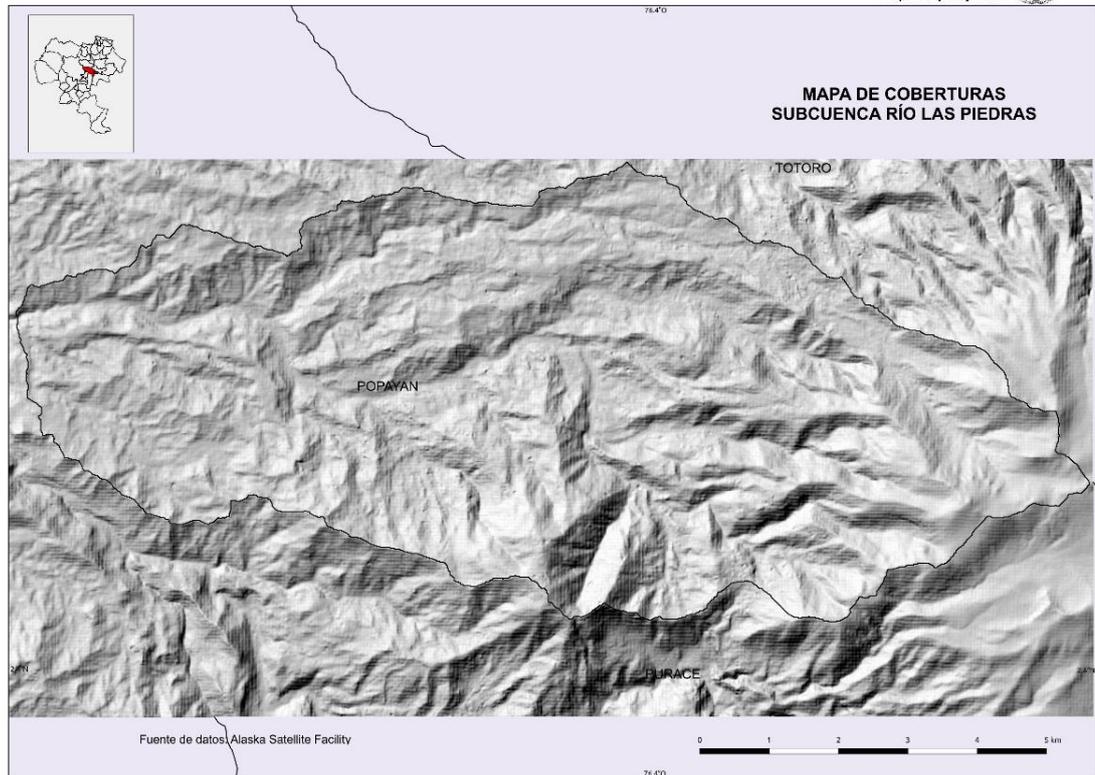


Figura 7. Modelo de elevación digital DEM. Fuente: Propia.

3.1.2 Mapa de tipo de suelos.

El mapa de tipo de suelos contiene información de las propiedades físicas y químicas de la subcuenca del río Las Piedras, con escala de 1:25.000 en formato shape (shp) (Figura 8); el cual se obtuvo de la información del estudio de suelos del Plan de Ordenación y Manejo de la Subcuenca Hidrográfica del río las Piedras (POMCH, 2006)⁶.

La tabla de información necesaria para el modelo SWAT, debe contener los siguientes campos: identificador de perfil, consociación, unidad cartográfica, pendiente, profundidad de los horizontes (mm), textura, densidad aparente, agua aprovechable en el suelo, conductividad hidráulica, porcentaje de arena, arcilla, limo y materia orgánica (%), y K. En el ANEXO 2 se describen los 22 perfiles con las características para cada uno.

⁶ Corporación Autónoma del Cauca. (2006). *Plan de Ordenación y Manejo de la Subcuenca Hidrográfica Río Las Piedras*. Popayán.

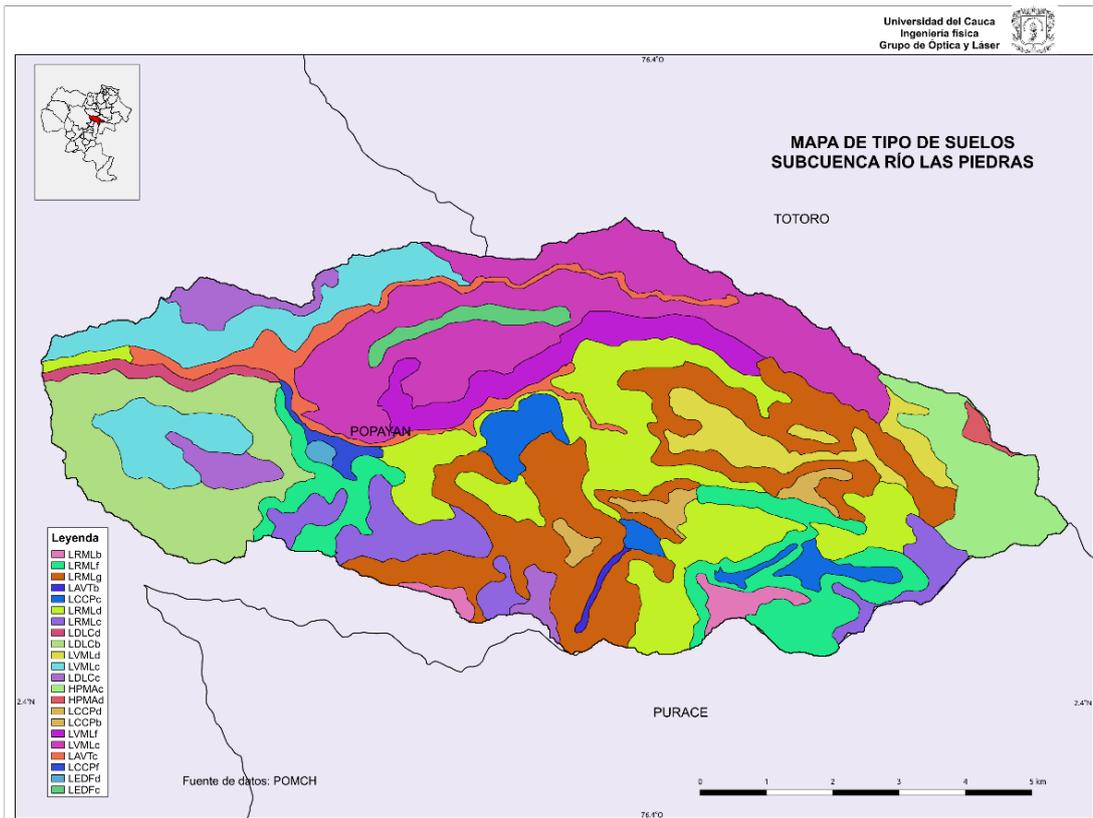


Figura 8. Mapa de tipo de suelos de la Subcuenca del Río Las Piedras. Fuente: POMCH 2006 y este estudio.

3.1.3 Mapa de uso de suelos.

El mapa de uso de suelos tiene información de datos biológicos sobre el tipo de coberturas presentes en la subcuenca del Río Las Piedras; las imágenes, obtenidas de la plataforma satelital Sentinel 2A tienen una precisión de 10 m (Tamaño de celda 10×10), en formato tif (Figura 9).

La elaboración del mapa de uso de suelos comprendió lo siguiente:

3.1.3.1 Obtención de imágenes satelitales.

Los productos del satélite Sentinel – 2A, se pueden descargar desde la página web Copernicus Open Acces Hub⁷ (SERCP, s. f.), dando la posibilidad de escoger las fechas de interés, la misión, el tipo de producto, y el porcentaje de nubes para la zona de interés (%). La interfaz de la página se muestra en la Figura 10.

⁷ Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

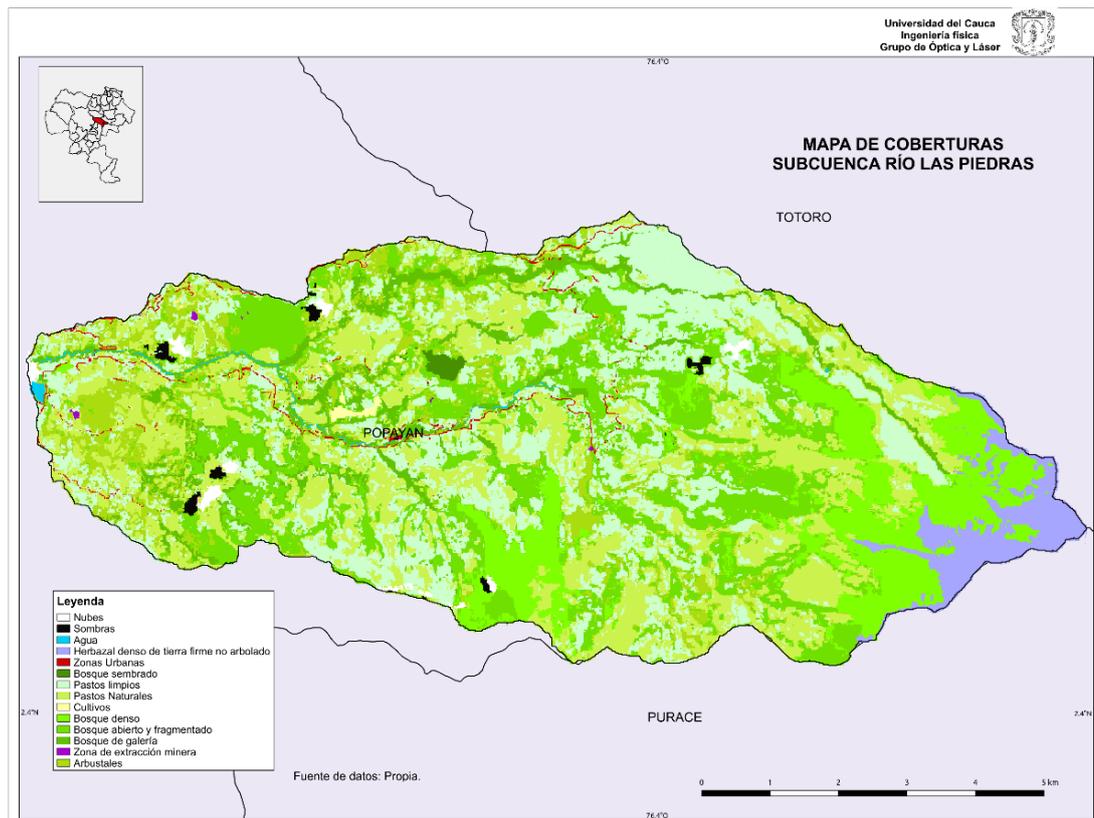


Figura 9. Mapa de uso de suelos de la Subcuenca del Río Las Piedras. Fuente: Propia

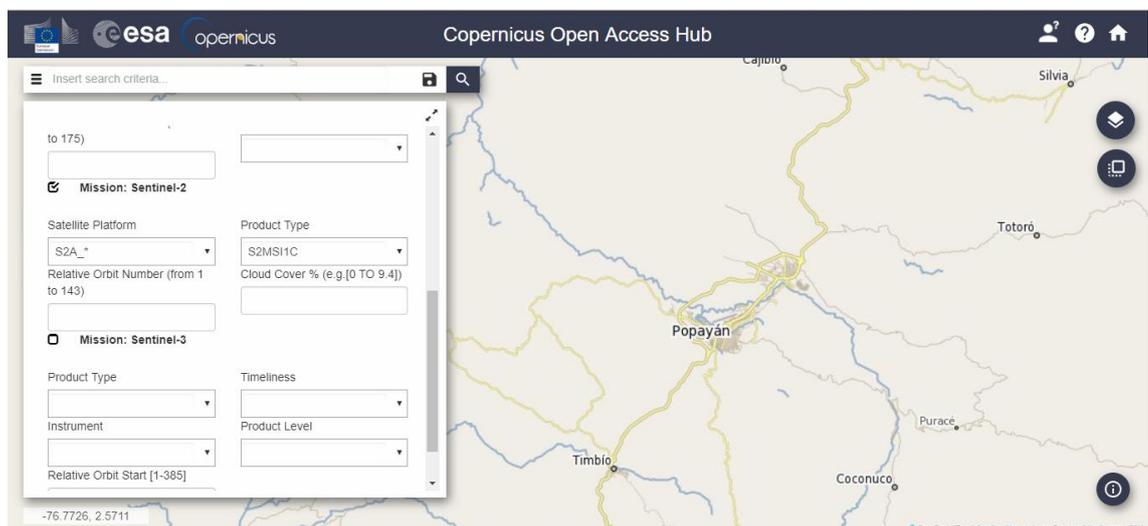


Figura 10. Interfaz de descarga misión Copernicus. Fuente: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

Para este proyecto, se escogieron imágenes con un periodo de tiempo desde el 01 de enero de 2016 hasta el 31 de diciembre de 2017, seleccionando la del 04 de abril de 2017, por el bajo porcentaje de nubes presentes en la zona de estudio.

Las etapas necesarias para obtener el mapa de uso de suelos se muestran en la Figura 11 y se explican a continuación:

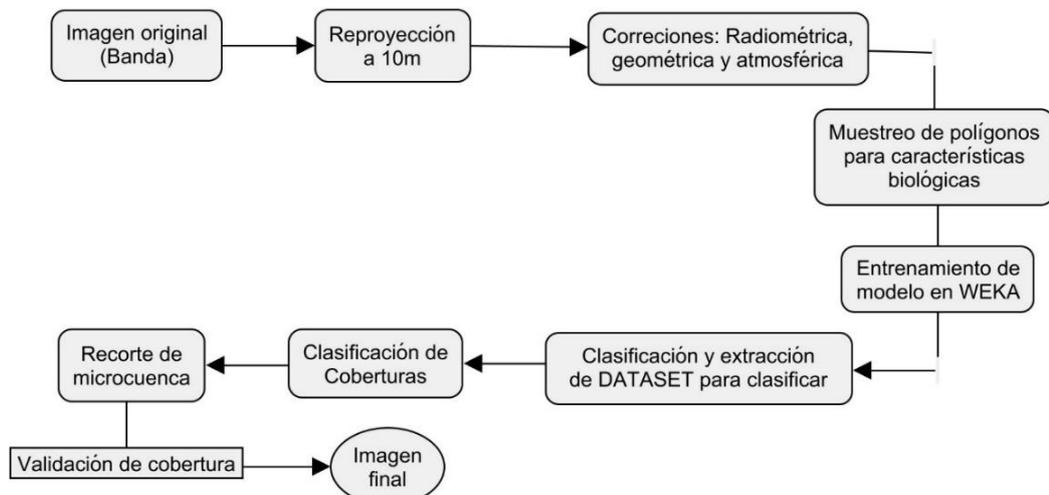


Figura 11. Esquema Fuente: Propia.

3.1.3.2 Acondicionamiento de las imágenes satelitales.

Para las 13 bandas, se aplicó la reproyección a 10 m para las bandas con proyección de 20 m y 60 m, y la corrección de tipo radiométrico, geométrico, atmosférico; con el fin de atenuar posible ruido proveniente del fallo en los sensores, distorsiones e interferencia de elementos en la atmósfera.

3.1.3.3 Clasificación de coberturas⁸.

Para obtener la clasificación final de las coberturas de la zona, se tuvo en cuenta:

1. Muestreo de polígonos como base de datos para ingresar al algoritmo de aprendizaje máquina.
2. Entrenamiento del modelo en WEKA.
3. Clasificación y extracción de dataset para la clasificación final.
4. Validación con expertos y líderes comunitarios de la subcuencia de estudio.

⁸ Red Interinstitucional de cambio climático y seguridad alimentaria. WP4 – RICCLISA.

En el proyecto, se tuvieron en cuenta 14 tipos de coberturas de niveles 1, 2, y 3 de acuerdo con la metodología Corine Land Cover⁹ (Tabla 4), por lo que fue necesario tener polígonos de muestra para todas las coberturas y garantizar una buena clasificación.

Tabla 4. Clasificación de coberturas Subcuenca Río Las Piedras.

CÓDIGO	COBERTURA
1	Nubes
2	Sombras
3	Cuerpos de agua
4	Herbazal denso de tierra firme
5	Zonas urbanas
6	Bosque sembrado
7	Pastos limpios
8	Pastos naturales
9	Cultivos
10	Bosque denso
11	Bosque abierto y fragmentado
12	Bosque ripario
13	Zona de extracción minera
14	Arbustales

Fuente: Propia

Los polígonos se pueden diferenciar por la combinación de color y como ejemplo de esta visualización se muestra en la Figura 12 a la derecha, uno para pastos naturales, y a la izquierda para pastos limpios; se tomaron aproximadamente 6247 puntos de muestreo para todas las coberturas, en la combinación de bandas 8-11-2 (Healthy vegetation).

Se realizó el entrenamiento del modelo para esta clasificación utilizando *WEKA*¹⁰ (Waikato Environment for Knowledge Analysis, en español “Entorno para análisis del conocimiento de la Universidad de Waikato”), la cual es una plataforma de software para el aprendizaje automático y la minería de datos, desarrollado en Java por la Universidad de Waikato.

⁹ “LEYENDA NACIONAL DE COBERTURAS DE TIERRA”. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia. Escala 1:100.000.

¹⁰ Weka 3: Data Mining Software in Java. <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/index.html>

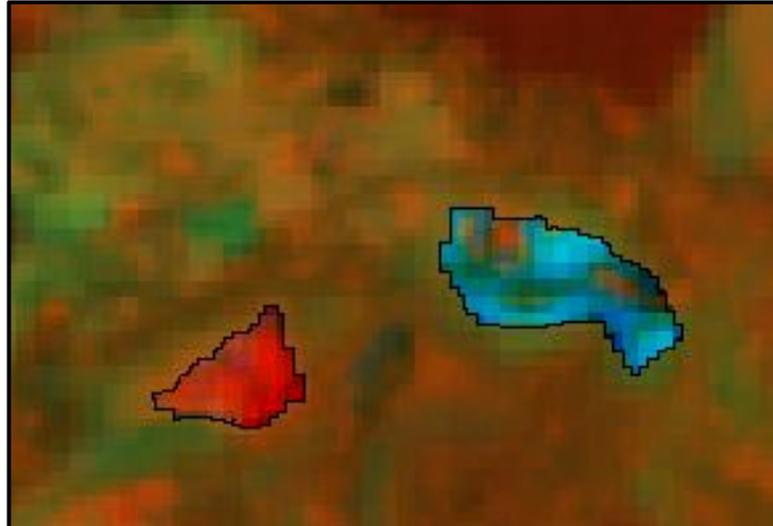


Figura 12. Polígonos de pastos naturales y pastos limpios. Fuente: Propia.

Los mejores resultados se obtuvieron realizando una distribución del 70% de la muestra para aprender y el 30 % restante para validar; con el algoritmo *Random Forest* implementado en *WEKA*; y se obtuvo un Kappa statistic de 0.9637 lo cual significa que los resultados fueron “muy buenos”, según Landis, J. Richard, Koch, 1977, resultando aproximadamente 5162 instancias de la zona correctamente clasificadas.

Mediante la extracción de los resultados obtenidos en *WEKA*, y teniendo en cuenta la información de las bandas espectrales del producto Sentinel 2A, de los índices de vegetación como ARVI, CRI1, EVI, NDVI, NDWI, SAVI, SIPI, SR, TVI, y del mapa de elevación digital DEM se ejecutó el algoritmo desarrollado por WP -4 Ricclisa (Pencue, E. L., Solano, Y. T., Corrales, J. C., Figueroa, 2016) para realizar la clasificación y reconstrucción de la imagen y obtener el resultado final de la clasificación de coberturas como se mostró en la Figura 9.

3.1.4 Base de datos climatológicos.

La base de datos utilizada se generó a partir de la información disponible en el AAPSA S.A – E.P.S, división ambiental, en convenio con el proyecto AQUARISC, y correspondió a datos diarios de precipitación en las estaciones climatológicas Arrayanales y El Diviso; con un periodo de tiempo, del 01 de enero de 1999 hasta el 31 de diciembre de 2017.

Tabla 5. Estaciones en la Subcuenca del Río Las Piedras.

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN
Arrayanales	2.461	-76.4422	2585
Diviso	2.4463	-76.4655	2356

Fuente: AAPSA, 2018.

Los datos climatológicos estadísticos requeridos por el modelo *SWAT*, en este caso para las estaciones mencionadas, son promedios multianuales de temperatura máxima y mínima y precipitación, desviación estándar para cada mes, coeficiente de sesgo para precipitación diaria, números de días de precipitación y probabilidades de un día húmedo después de un día seco y de un día húmedo después de uno húmedo, los cuales fueron calculados por las fórmulas sugeridas en el manual de *SWAT*¹¹. En las tablas se muestran los parámetros para las estaciones Arrayanales y El Diviso (ANEXO 3.).

3.2 APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO *SWAT*

El modelo hidrológico *SWAT* se simuló, calibró y validó para la subcuenca del Río Las Piedras, con el fin de obtener resultados con los que se pueda estimar la contaminación difusa en la zona, bajo las condiciones actuales (Escenario 1 - E1) y en posibles escenarios críticos de contaminación difusa: por incremento de la producción agrícola y escenarios críticos de calidad del agua (por aportes de sedimentos e incremento en turbidez, que limitan la disponibilidad de agua para consumo humano) (Escenario 2 - E2), y un escenario por incremento de precipitación (Escenario 3 - E3).

Es necesario que la cartografía requerida por el modelo hidrológico *SWAT* esté en la misma proyección. La aplicación del modelo requirió los siguientes pasos:

3.2.1 Delineación de la subcuenca y microcuencas.

A partir del mapa de elevación digital DEM, en proyección WGS 84 / UTM zone 18N y precisión de 12.5 m, se obtuvieron las curvas de nivel, la dirección de flujo y acumulación de las corrientes de agua, las pendientes, y la red hídrica (Figura 13). Con esta información, de forma automatizada se generó y delineó el contorno de la subcuenca, con un área de 6.606,27 Ha.

¹¹ Input/Output Documentation. Versión 2012

A partir del modelo de elevación digital - DEM, la máscara del área de estudio, y la red hídrica se calculó la dirección del flujo y acumulación de las corrientes de agua dentro de las microcuencas y se definieron algunas características como pendientes y elevaciones máximas, mínimas.

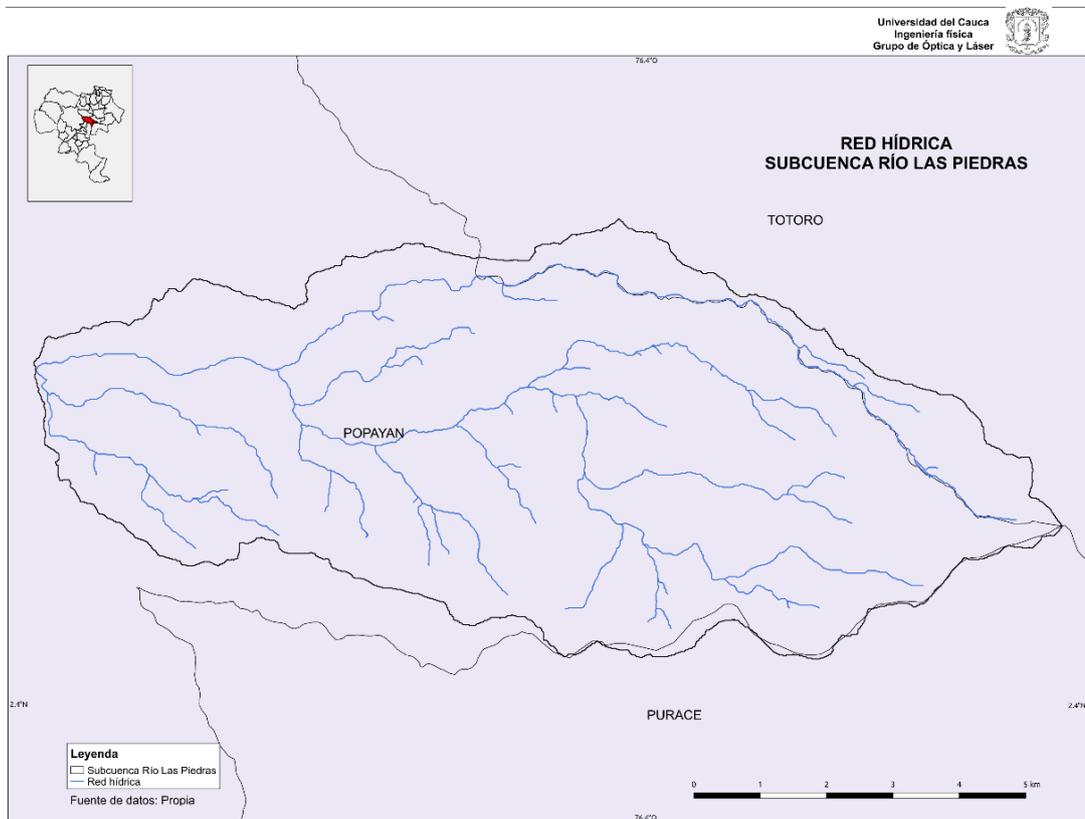


Figura 13. Red hídrica Subcuenca del río Las Piedras. Fuente: Propia.

Para generar las microcuencas se tuvo en cuenta el DEM y la red hídrica, se seleccionaron manualmente outlets para drenajes principales del río Las Piedras, definiéndose 18 microcuencas como se observa en la Figura 18. Estas microcuencas fueron igualmente validadas con actores claves de la subcuenca.

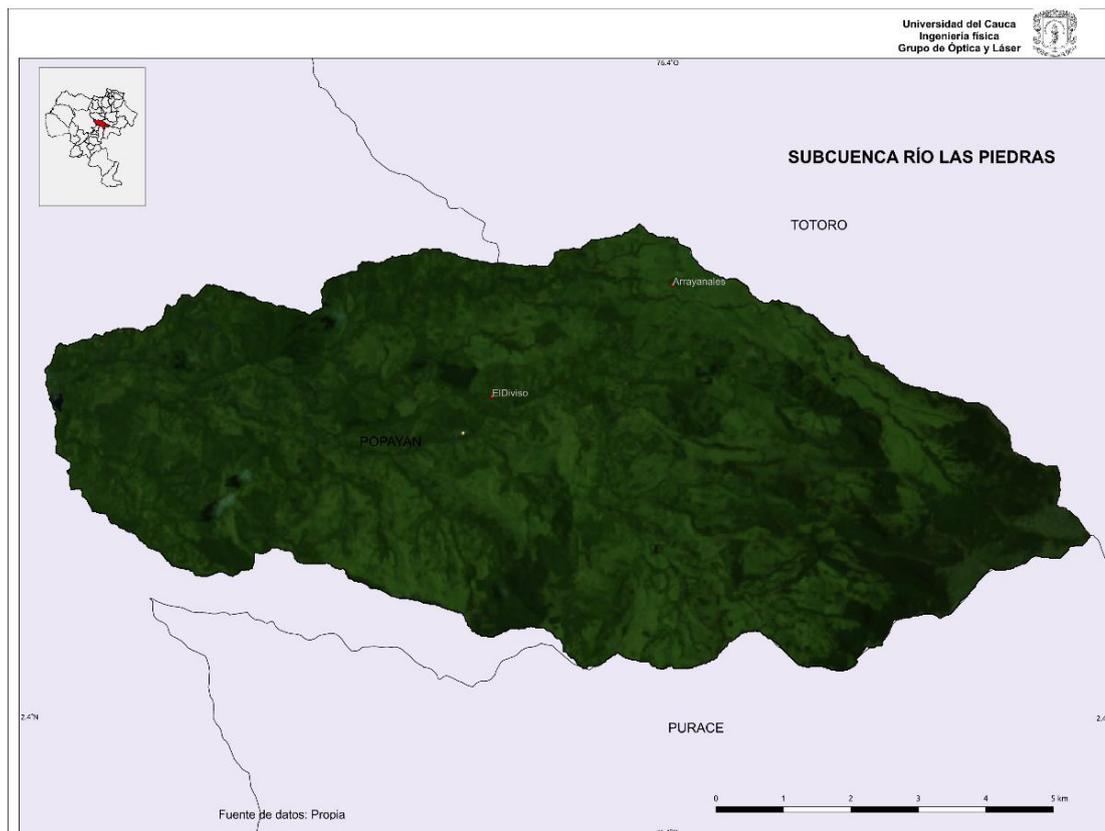


Figura 14. Subcuenca del Río Las Piedras. Fuente: Propia.

Tabla 6. Microcuencas definidas para la Subcuenca del Río Las Piedras.

MICROCUENCA	NOMBRE	ÁREA (Ha)	ELEVACIÓN	
			MÁXIMA (m)	MÍNIMA (m)
1	Piedras	943.58	1902	2667
2	Santa Teresa	839.88	2084	2966
3	Pavas	529.33	2821	3799
4	Santa Teresa II	29.13	2821	3174
5	Arrayanales	592.68	2340	3325
6	Robles	815.90	1902	2582
7	La Chorrera	115.12	2386	2989
8	El Limonal	274.46	2107	2520
9	Palmichal	121.53	2386	2804
10	Pichagua	186.53	2268	3143
11	Carnicerías	214.25	2128	2745
12	El Vaho	405.37	2194	3178
13	Aguas Claras	310.34	2466	3201
14	La Cabaña	92.20	2836	3623
15	Piedra Negra	116.26	2835	3796
16	San Pedro	288.12	2466	3093
17	El Cedro	182.31	2565	3185

18	Peñas Blancas	549.28	2617	3798
----	---------------	--------	------	------

Fuente: Propia.

3.2.2 Creación y definición de las unidades de respuesta hidrológica – HRU.

Para generar las unidades de respuesta hidrológica – HRU, se tuvo en cuenta el mapa de tipo de suelos, el mapa de uso de suelos y las pendientes. Para el tipo de suelos se utilizaron 22 unidades (Tabla 7), para uso de suelos 12 coberturas diferentes mostradas en la Tabla 8 y cuatro rangos para pendientes (Tabla 9.)

Tabla 7. Unidades de suelo.

ID	UNIDAD
1	LRMLb
2	LRMLf
3	LRMLg
4	LAVTb
5	LCCPc
6	LRMLd
7	LRMLc
8	LDLCf
9	LDLCb
10	LVMLd
11	LDLCd
12	LDLCc
13	HPMAc
14	HPMAd
15	LCCPd
16	LCCPb
17	LVMLf
18	LVMLc
19	LAVTc
20	LCCPf
21	LEDFd
22	LEDFc

Fuente: Propia

Tabla 8. Codificación de coberturas para SWAT.

COBERTURA	CÓDIGO SWAT
Cuerpos de agua	WATR
Herbazal denso de tierra firme	WETN
Zonas urbanas	URML
Bosque sembrado	FRSE
Pastos limpios	SPAS
Pastos naturales	PAST
Cultivos	AGRL
Bosque denso	FRSD
Bosque abierto y fragmentado	FRST
Bosque ripario	WETF
Zona de extracción minera	SWRN
Arbustales	RNGE

Fuente: Appendix A: Model databases. Swat model

Tabla 9. Rango de pendientes para SWAT.

RANGO	PENDIENTE	DESCRIPCIÓN
1	0 – 3 %	Ligeramente plano
2	3 – 25 %	Plano
3	25 – 75 %	Inclinado
4	≥ 75%	Escarpado

Fuente: Propia.

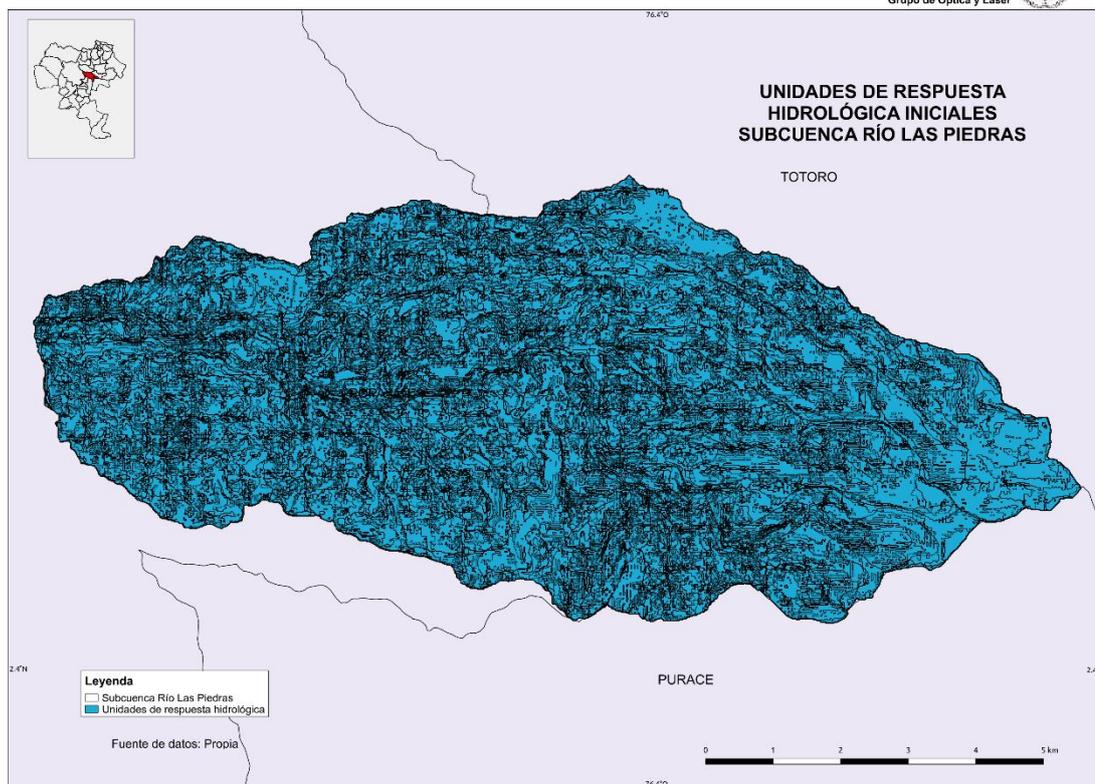


Figura 15. Unidades de respuesta hidrológica iniciales. Fuente: Propia.

A partir del cruce de las capas mencionadas, se generaron 1687 unidades de respuesta hidrológica (Figura 15.), de las cuales se escogió un porcentaje mínimo para usos, suelos y pendientes eliminando las HRU con porcentaje de área menor que el nivel mínimo seleccionado, después del proceso de eliminación el área restante de uso, suelo y pendiente es repartida para cubrir el 100% de la cuenca modelada.

Utilizando el 1 % (3.34 Ha) para usos de suelo y cobertura, 6 % (16.68 Ha) como valor mínimo para tipo de suelos y 10 % (19.8 Ha) para rango de pendiente, se generaron 607 HRU distribuidas en las 18 microcuencas (Figura 16).

La información generada fue la base para la simulación hidrológica de la situación actual de la Subcuenca del Río Las Piedras (E1) y de los escenarios bajo diferentes condiciones (E1 y E2).

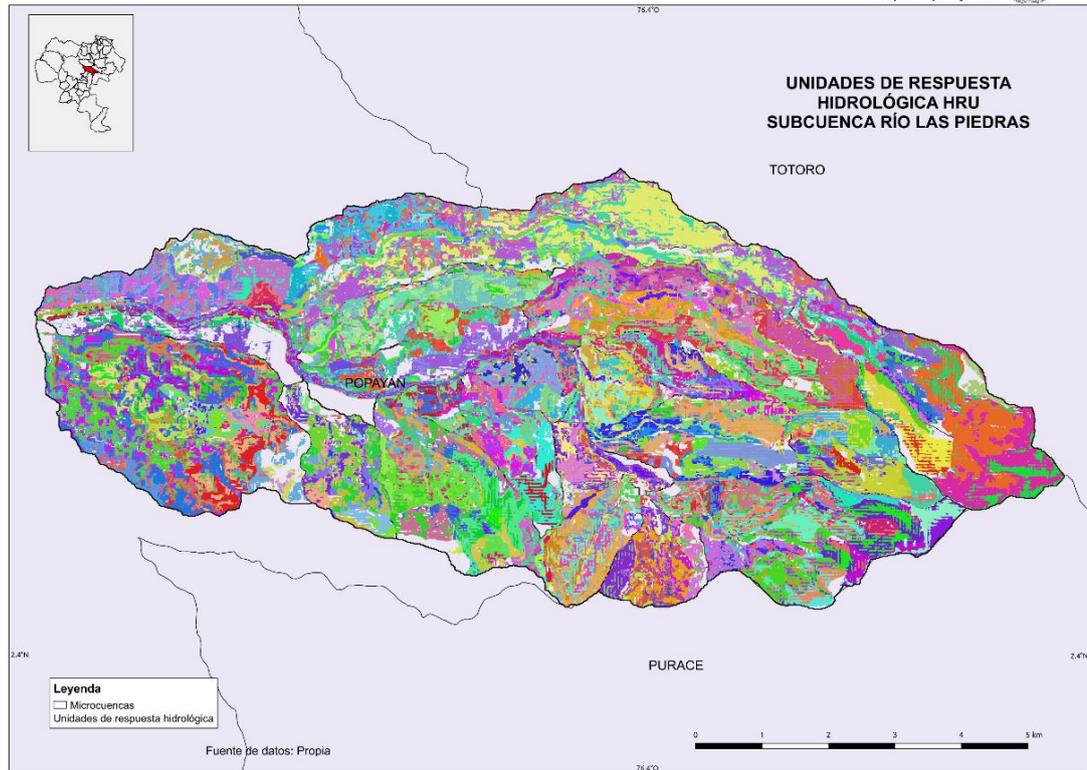


Figura 16. Unidades de respuesta hidrológicas. Fuente: Propia.

3.2.3 Generador climático y tablas de datos meteorológicos.

Para este proceso, se introduce la información de la ubicación de las estaciones climáticas, de los datos estadísticos (Tabla 19) y de los datos diarios de precipitación (mm) de las dos estaciones: Arrayanales y El Diviso. Los valores de entrada de radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, fueron simulados y completados por SWAT. Con esta información se constituyeron las bases de datos iniciales para los cálculos del generador climático que le permite al modelo hidrológico simular el comportamiento climático en cada microcuenca.

3.2.4 Simulación.

Se ejecutó el modelo, en el periodo específico del 01 de enero de 1999 al 30 de diciembre de 2017, con el método de distribución de lluvia lineal, sin tener en cuenta ciclos de periodos de años de calentamiento y con periodicidad mensual.

Este modelo permite analizar diferentes variables hidrológicas de la subcuenca como precipitación, producción de agua al caudal, agua disponible en el suelo, evapotranspiración potencial y real, flujo lateral, percolación, escorrentía, entre

otros. Y para análisis de contaminación en el agua, permite analizar variables como sedimentos, nitrógeno orgánico, fosforo orgánico, nitratos, fósforo soluble; es decir, los valores de estas variables son el resultado de la interacción agua-suelo-clima-uso-pendiente en la subcuenca para un periodo simulado.

3.2.5 Calibración y validación.

La calibración del modelo hidrológico SWAT para la subcuenca del Río Las Piedras se realizó con ayuda del software SWAT – CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures), el cual es un programa diseñado para integrar varios algoritmos de análisis de calibración/incertidumbre, como SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), ParaSol (Parameter Solution), PSO (Particle Swarm Optimization).

Se utilizó SUFI2, el cual funciona a “prueba y error” cambiando aleatoriamente los valores de parámetros de interés, como Cn2 (Initial SCS CN II value), Alpha_Bf (Base flow alpha factor), Gw_Delay (Groundwater delay), GWQMN (Threshold water depth in the shallow aquifer for flow) slope (Average slope steepness), Sol_K (Saturated hydraulic conductivity), entre otros, hasta obtener una coincidencia razonable entre la simulación y los valores observados.

En este caso, el modelo se calibró utilizando datos de caudal en la microcuenca Piedras, debido a que en ella es donde se encuentra el cauce principal del río Piedras y de dónde se tenían valores mensuales de caudal con un periodo de diez años comprendidos entre 1999-2009; para la validación se utilizaron los años 2015-2016. Se realizaron cuatro iteraciones, de 200 simulaciones cada una, cambiando los parámetros mencionados anteriormente, para la calibración; y una iteración de 200 simulaciones, para la validación.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo a los objetivos planteados y el desarrollo del proyecto, se presentan los siguientes resultados:

A partir de las imágenes satelitales obtenidas y el procesamiento de las mismas, se obtuvo la actualización de las coberturas presentes en la Subcuenca del río Las Piedras a abril de 2017 y por la resolución del satélite Sentinel 2A (10 m) se logró ampliar el número de coberturas a 14, para ver la transición entre bosque, arbustales y pastos naturales Figura 9.

Con el mapa de uso de suelos y la red hídrica se hizo un buffer del cordón ripario de aproximadamente 70 m de ancho, a lo largo del cauce principal del río Las Piedras y algunos tributarios principales, con el fin de observar las zonas de cultivo y pastos limpios presentes como se observa en la Figura 17.

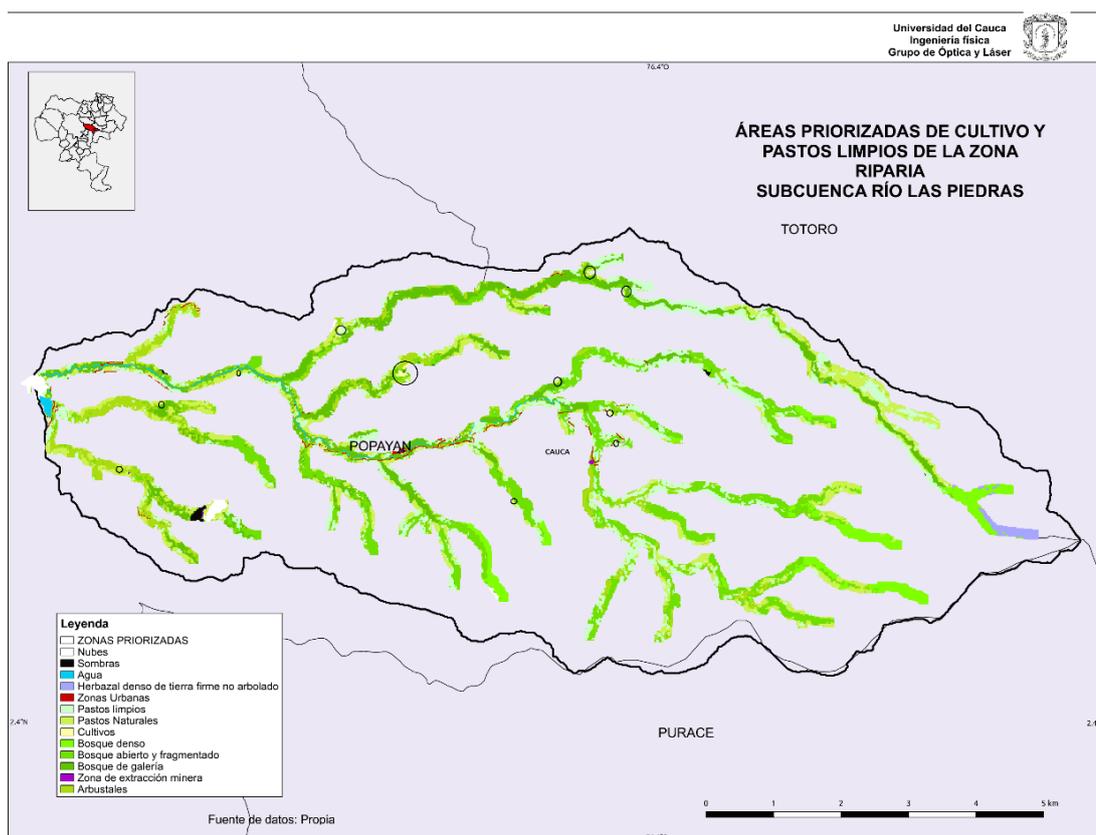


Figura 17. Zonas prioritizadas de cultivo y pastos limpios de la zona riparia en la Subcuenca Las Piedras. Fuente: Propia.

En la anterior figura, se muestran las zonas priorizadas de cultivos dentro de un círculo, encontrándose principalmente en las microcuencas Santa Teresa, Arrayanales y El Limonal; lugares de dónde se tiene conocimiento hay presencia de cultivos de papa, frijol y maíz (CRC 2016). Debido a esta práctica se presenta el uso de diferentes fertilizantes y pesticidas, de origen químico y orgánico, los cuales se relacionan con procesos de contaminación por fuentes no puntuales en la zona. La principal actividad productiva en la subcuenca es la ganadería, seguido de la agricultura y la actividad piscícola, en este sentido, los procesos productivos en conjunto constituyen un limitante para la calidad del agua en la subcuenca.

4.1 ÁREA DE LA SUBCUENCA Y MICROCUENCAS DEFINIDAS

Para este estudio, se trabajó con un área de 6.606,27 Ha, aproximadamente 20 Ha menos que la reportada por Ruiz et al., 2017 y el Acueducto y Alcantarillado de Popayán - S.A. E.P.S¹², debido a que la precisión del mapa de elevación digital - DEM utilizado era mayor (de 30 m a 12.5 m), haciendo que los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos presentes en el mismo se observen mejor, y logrando que la delimitación del contorno de la subcuenca sea más precisa mostrándose en la Figura 14.

A partir de la delimitación de la subcuenca, se generaron y definieron 18 microcuencas que se muestran en la Figura 18. Estas microcuencas se llaman: Aguas Claras, Arrayanales, Carnicerías, El Cedro, El Limonal, El Vaho, La Cabaña, La Chorrera, Palmichal, Las Pavas, Peñas Blancas, Pichagua, Piedra Negra, Piedras, Robles, San Pedro, Santa Teresa y Santa Teresa II

De acuerdo con los resultados de este estudio y los reportados por Mejía Recaman, 2017¹³, se confirma que la microcuenca Robles sí está incluida en la Subcuenca del Río Las Piedras, y microcuencas como:

- Santa Teresa se dividió en: Santa Teresa, Las Pavas y Santa Teresa II.
- Aguas Claras se dividió en: Aguas Claras, La Cabaña y San Pedro.
- Buena Vista se dividió en: El Cedro, Peñas Blancas y Piedra Negra.

¹² Acueducto y Alcantarillado de Popayán – S.A. E.P.S
<http://www.acueductopopayan.com.co/gestion-ambiental/fundacion-procuenca-rio-las-piedras/fuentes-de-abastecimiento/cuenca-piedras/>

¹³ Manejo adaptativo del territorio en una cuenca Altoandina desde la diversidad cultural y ecosistémica. Pág. 74.

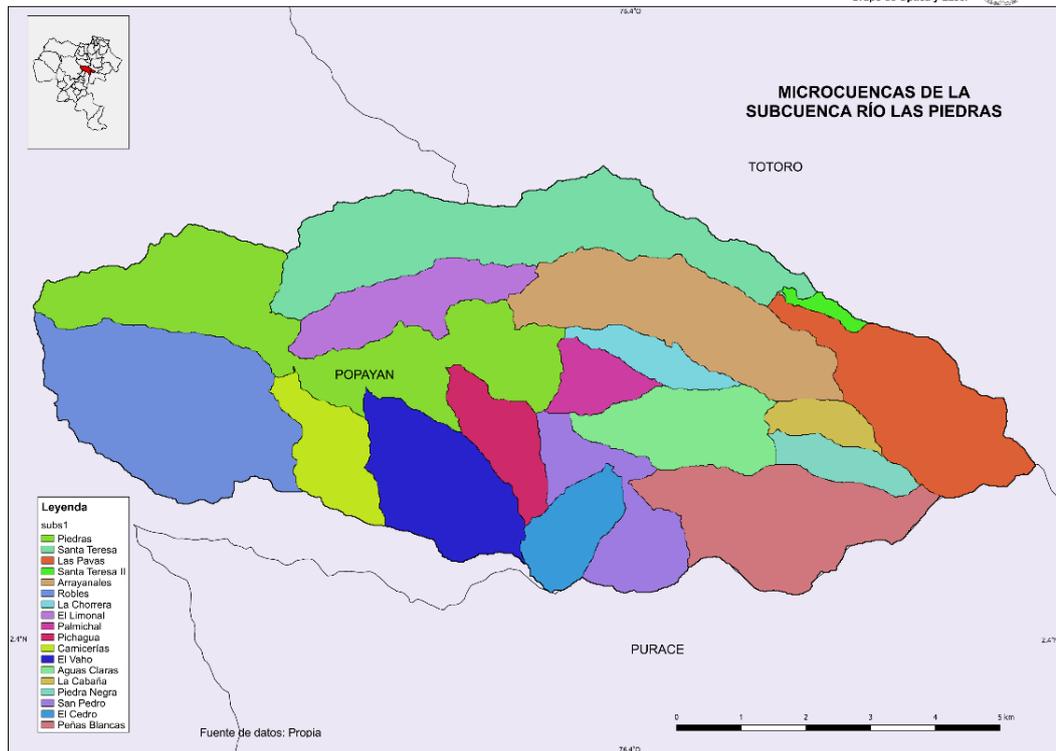


Figura 18. Microcuencas de la subcuenca Río Las Piedras. Fuente: Propia.

4.2 ANÁLISIS DE LAS UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA (HRU)

El modelo hidrológico SWAT genera 4 archivos de salida¹⁴ por cada simulación, tomando en cuenta como unidad mínima de análisis la HRU, la cual es el resultado de las posibles combinaciones entre cobertura, uso del suelo y pendiente como se observa en la Figura 19 en total el modelo identificó 607 HRU.

Las HRU identificadas permiten analizar las condiciones generales de la subcuenca al ser agrupadas por su representatividad con respecto al área total como se observa en la Tabla 10. En este sentido, se puede identificar que la mayor extensión de HRU corresponde a coberturas antropizadas (pastos limpios) relacionado con la principal actividad productiva de la zona que es la ganadería. Por su parte la representatividad de coberturas naturales reguladoras, como el bosque denso (11,55% área de la subcuenca) es baja y se encuentra principalmente hacia las zonas altas, donde la producción agropecuaria es limitada por las condiciones del terreno con fuertes pendientes y zonas de ladera. Las coberturas de pastos naturales, se convierten en áreas

¹⁴ Archivos de salida estándar (.std), resultados por cada URH (.sbs), resultados por subcuenca (.bsb) y resultados por corriente de agua (.rch).

de especial interés ambiental, debido a que son zonas potenciales de uso ganadero y de ampliación de frontera agrícola.

Figura 19. Representación esquemática de las HRU, subcuenca río las Piedras.



Fuente: Propia.

Tabla 10. HRU distribuidas por sus componentes dominantes.

PARÁMETRO	Área [ha]	% Subcuenca
COBERTURAS		
Pastos Limpios	2446	37,02
Pastos Naturales	2310	34,97
Bosque abierto y fragmentado	1018	15,41
TIPO DE SUELO (Unidades cartográficas)		
LRMLg	1747	26,45
LVMLc	1143	17,31
LDLCd	944	14,28
PENDIENTE (%Inclinación)		
25-75	5492	83
03-25	115	17

Fuente: Propia.

Respecto al tipo de suelo y pendiente, las HRU agrupan unidades cartográficas con características de mediana y baja fertilidad (Figura 20), de acuerdo con la clasificación de las tierras por su Capacidad de Uso¹⁵ (Mosquera, L., M. Polo, 1986)(MOSQUERA, Polo et al. 1986)(MOSQUERA, Polo et al. 1986), las unidades LVMLc (17%), se agrupa en la subclase IIIe e indican suelos aptos para la siembra de cultivos de clima frío, sin embargo estas prácticas deben realizarse bajo parámetros de sistemas productivos sostenibles, debido a que son suelos altamente susceptibles a procesos erosivos, la unidad LDLCd pertenece a la

¹⁵ Considera las variables limitantes de erosión, humedad edáfica, zona radicular, clima, vientos fuertes, pendiente, fertilidad, propiedades químicas.

subclase Ve, corresponde a suelos con procesos intensivos de degradación y pérdida de capa superficial, lo cual es limitante para los sistemas productivos, por ello requieren reposición de los nutrientes y manejo de coberturas de restauración. Por su parte los suelos de la unidad LRMLg (16%), presentan condiciones altamente limitantes para la producción agrícola, siendo necesarias las técnicas de siembra escalonada y de policultivos de bajo estrato a nivel de huerta familiar (Subclase VIIr) donde el principal uso de estos suelos es de conservación mediante cobertura de bosque de porte bajo o de bajo peso que facilite el amarre de los suelos y disminuya los riesgos de erosión (CRC, 2016).

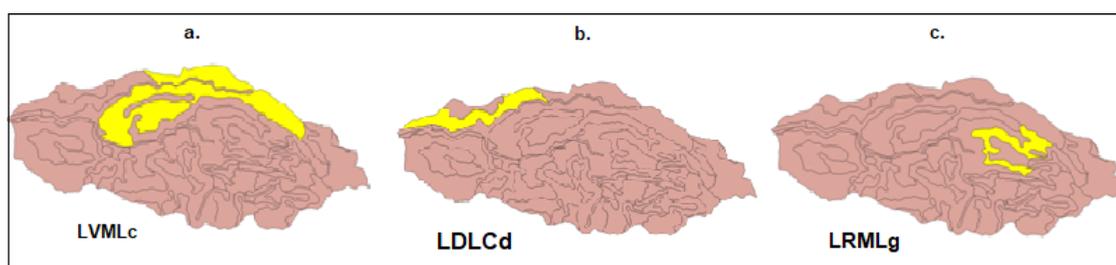


Figura 20. Distribución de suelos dominantes según HRU priorizadas. Fuente: Propia.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, se aplicaron criterios de priorización que permitieron identificar las HRU relacionadas con la regulación hídrica por cobertura vegetal y de este modo se priorizaron las coberturas naturales que se muestran en la Tabla 11 y las pendientes considerando la susceptibilidad a procesos erosivos 1 (0 – 25), 2 (25-75) y 3 para las zonas críticas (≤ 75).

Tabla 11. Priorización de coberturas.

Cobertura	Priorización
Bosque denso	1
Bosque Ripario	1
Páramo	1
Bosque abierto y fragmentado	2
Pastos Naturales	2
Arbustales	3
Bosque sembrado	4
Pastos Limpios	4
Cultivos	5
Zona de extracción minera	5
Zonas Urbanas	5

Fuente: Propia.

Con estos criterios, se logró identificar las microcuencas que agrupan HRU de importancia hídrica, por su función reguladora y aquellas donde es necesario fortalecer los procesos de uso y manejo sostenible de los suelos Figura 21. De igual manera, la distribución de HRU se ajustó a 241 unidades, cómo se observa

en la Figura 22 donde cada unidad de respuesta hidrológica está representada por un color diferente.

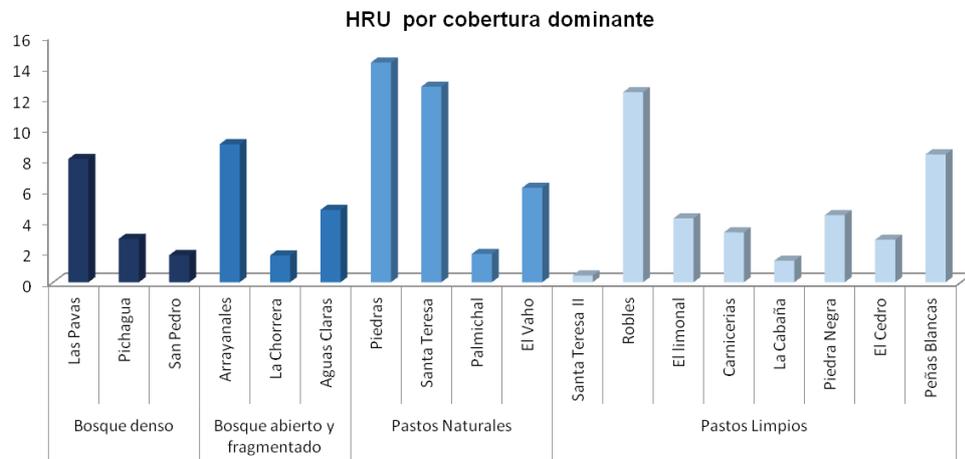


Figura 21. Distribución de HRU por tipo de cobertura. Fuente: Propia.

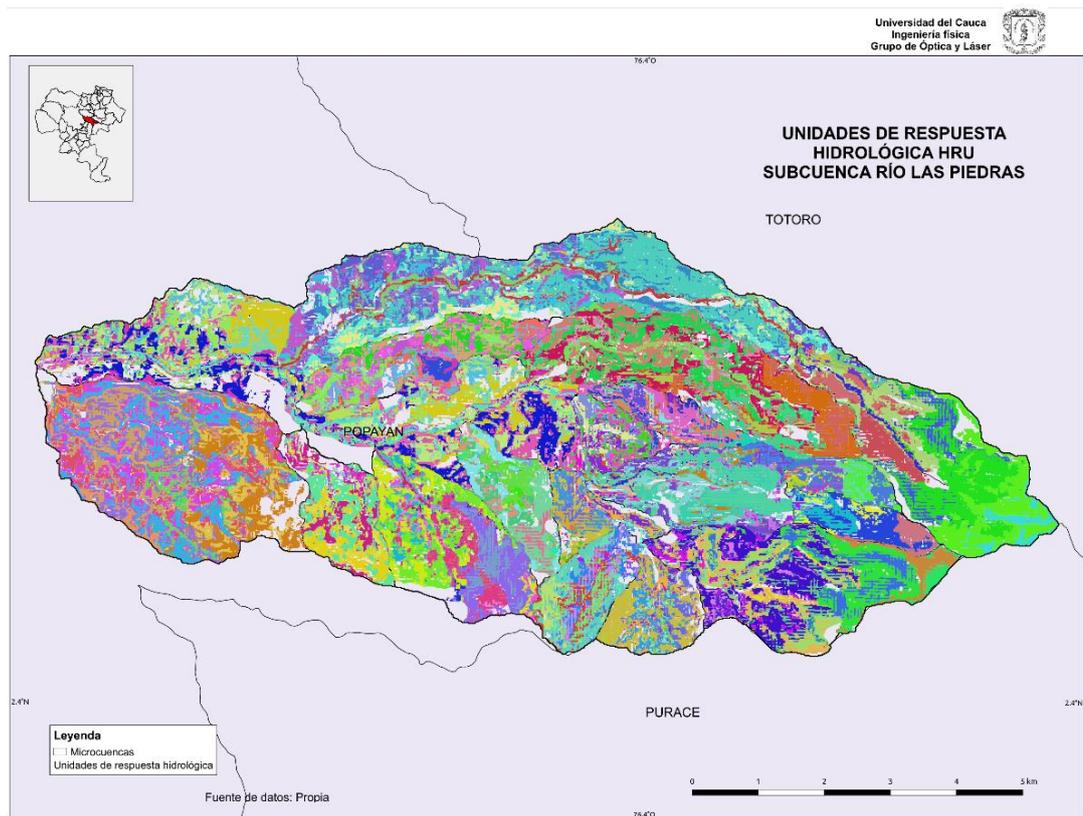


Figura 22. Mapa de HRU ajustado a 241 unidades. Fuente: Propia.

Otra distribución para las HRU fue por unidad dominante en cada microcuena, cómo se observa en la Tabla 12, cada HRU dominante se extrapola al total del

área de la microcuenca. Cada combinación se diferencié con un color teniendo en cuenta solo el uso de suelo, y por el porcentaje de área total se puede identificar que la cobertura dominante en las HRU corresponde a pastos limpios (SPAS), debido a que la ganadería es la principal actividad económica de la zona, cómo se mencionó anteriormente.

Tabla 12. Unidades de respuesta hidrológica priorizadas por unidad dominante.

MICROCUENCA	COMBINACIÓN	%AREA	AREA [HA]
Piedras	PAST/LDLCd/25-75	14.28	943.58
Santa Teresa	PAST/LVMLc/3-25	12.71	839.88
Las Pavas	FRSD/HPMAc/25-75	8.01	529.33
Santa Teresa II	SPAS/LVMLc/25-75	0.44	29.13
Arravanales	FRST/LRMLg/25-75	8.97	592.67
Robles	SPAS/LDLCb/25-75	12.35	815.90
La Chorrera	FRST/LVMLd/25-75	1.74	115.021
El limonal	SPAS/LVMLc/3-25	4.15	274.46
Palmichal	PAST/LRMLd/25-75	1.84	121.53
Pichagua	FRSD/LRMLg/25-75	2.82	186.53
Carnicerías	SPAS/LRMLf/25-75	3.24	214.24
El Vaho	PAST/LRMLg/25-75	6.14	405.36
Aguas Claras	FRST/LRMLd/25-75	4.7	310.33
La Cabaña	SPAS/LRMLg/25-75	1.4	92.19
Piedra Negra	SPAS/LRMLg/25-75	4.36	288.12
San Pedro	FRSD/LRMLd/25-75	1.76	116.26
El Cedro	SPAS/LRMLg/25-75	2.76	182.31
Peñas Blancas	SPAS/LRMLf/25-75	8.31	549.28

Fuente: Propia.

4.3 SITUACIÓN ACTUAL DE LA SUBCUENCA

Los resultados de la simulación del modelo hidrológico *SWAT* para el periodo 1999 – 2017 (Escenario 1), se presentan en variables hidrológicas, el ciclo del nitrógeno y del fósforo y pérdida de nutrientes en el suelo.

Para las variables hidrológicas, se presentan los resultados de precipitación, escorrentía, flujo lateral, flujo de retorno, percolación, contenido inicial de agua en el suelo, evapotranspiración potencial y real, y agua disponible.

Los resultados se presentan en mm y en la Tabla 13 se muestra el acumulado anual para la Subcuenca desde 1999 hasta 2017, encontrándose los valores más bajos en las variables para los años 2002 y 2015, resaltados en color azul, coincidiendo en que estos años fueron de fase de calentamiento o niño del fenómeno Niño - Oscilación del Sur y los más alto para 1999, 2000, 2007, 2011, en color amarillo, años con fase de enfriamiento o Niña.

Tabla 13. Resultados hidrológicos para la simulación 1999-2017.

AÑO	PRECIPITACIÓN (mm)	ESCORRENTÍA (mm)	FLUJO LATERAL (mm)	FLUJO DE RETORNO (mm)	PERCOLACIÓN (mm)	CONTENIDO INICIAL DE AGUA EN EL SUELO (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (mm)	EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (mm)	AGUA DISPONIBLE (mm)
1999	2098.33	122.9	784.61	106.56	149.36	77.53	1105.81	3369.43	1020.34
2000	1830.46	78	705.16	109.17	133.39	25.8	969.57	3045.97	899.7
2001	843.95	3.66	284.02	2.39	6.39	24.09	558.37	3682.96	290.79
2002	977.12	16.47	355.95	2.67	11.03	39.32	585.8	3800.26	375.55
2003	1479.2	65.33	537.85	8.58	41.85	75.89	803.22	3661.95	612.67
2004	965.29	34.77	378.81	11.82	19.88	37.28	577.37	3704.38	427.28
2005	1287.1	14.44	407.97	12.88	44.18	72.06	788.39	3259.09	436.97
2006	1448.66	41.69	476.97	23.27	67.33	92.79	847.37	3325.51	545.15
2007	1495.28	47.9	497.95	27.35	72.98	92.34	881.05	3297.54	575.8
2008	1547.77	92.79	495.76	82.97	102.75	72.22	881.13	2956	678.04
2009	1524.66	72.41	514.9	41.98	66.67	89.01	856.69	3046.38	632.67
2010	1891.02	49.21	690.91	22.41	52.69	108.74	1082.01	3263.06	764.52
2011	3298.55	357.99	1338.47	205.99	336.76	130.94	1245.04	3007.85	1914.8
2012	1576.35	108.64	564.09	138.42	117.67	50.4	873.47	3577.4	822.19
2013	1483.31	73.09	490.82	22.11	72.91	77.72	823.21	3330.24	588.24
2014	1316.08	87.86	443.92	87.65	102.36	62.37	702.19	3482.17	625.44
2015	632.32	19.34	207.82	18.58	17.87	2.23	455.34	3910.57	247.84
2016	1331.74	12.34	438.67	1.98	15.14	80.26	789.86	3697.99	453.34
2017	2209.71	124.55	819.54	63.81	138.08	100.71	1108.71	3344.45	1013.64

Fuente: Propia.

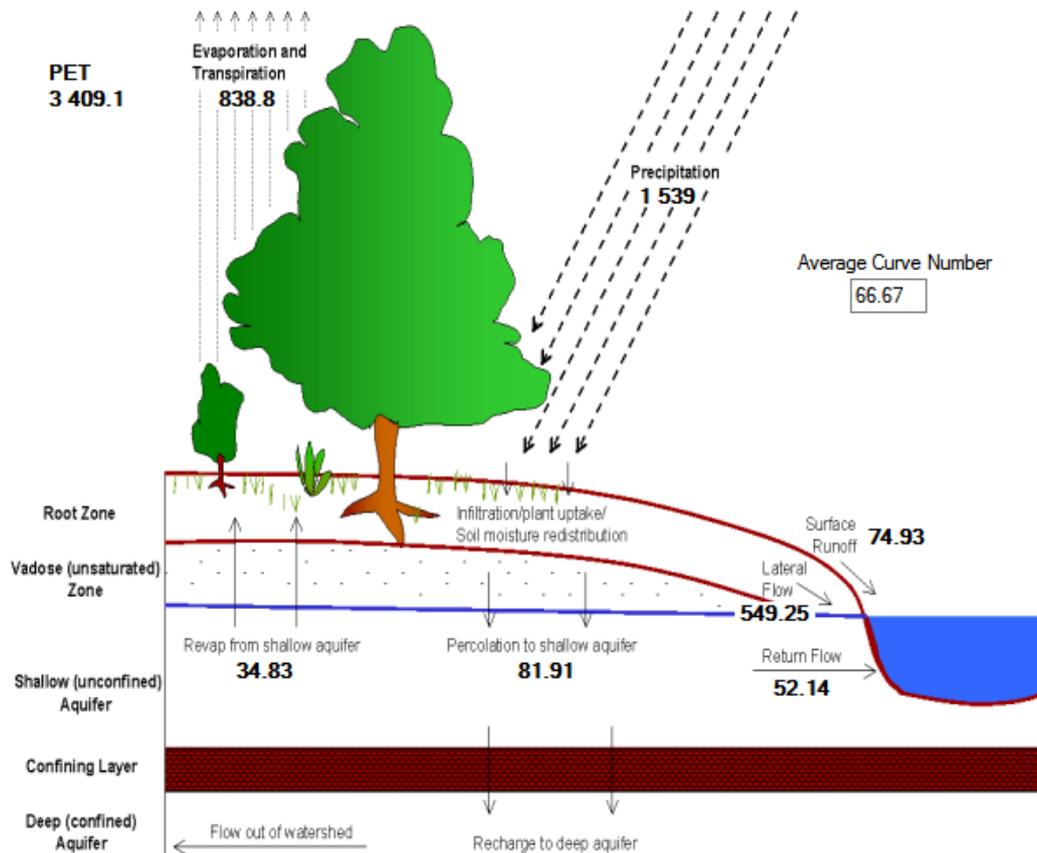


Figura 23. Resultados hidrológicos para la Subcuenca Río Las Piedras. Fuente: Propia.

Cómo para la simulación no se tuvo en cuenta años de calentamiento, se observa en la Figura 23 que el flujo lateral es mayor que el de agua subterránea, que el rendimiento de agua puede ser excesivo y que la escorrentía superficial puede ser demasiado baja.

(8), Santa Teresa (2) y Santa Teresa II (4) y Piedras (1) debido a que son zonas con alta demanda en cultivos y producción ganadera, que obedece al uso de agroinsumos. La Chorrera (1), Palmichal (9), Aguas Claras (13) y La Cabaña (14) son microcuencas con producción de cultivos en menor cantidad por lo que sus resultados para nitratos en escorrentía superficial no son tan altos; y las microcuencas en verde tienen baja producción en nitrógeno y nitratos, ya que son zonas de conservación.

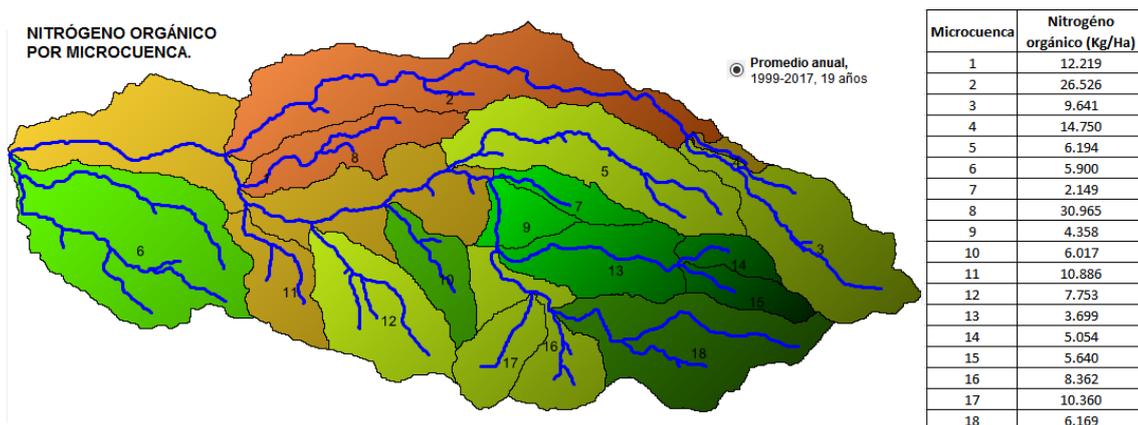


Figura 25. Nitrógeno orgánico por microcuenca. Fuente: Propia.

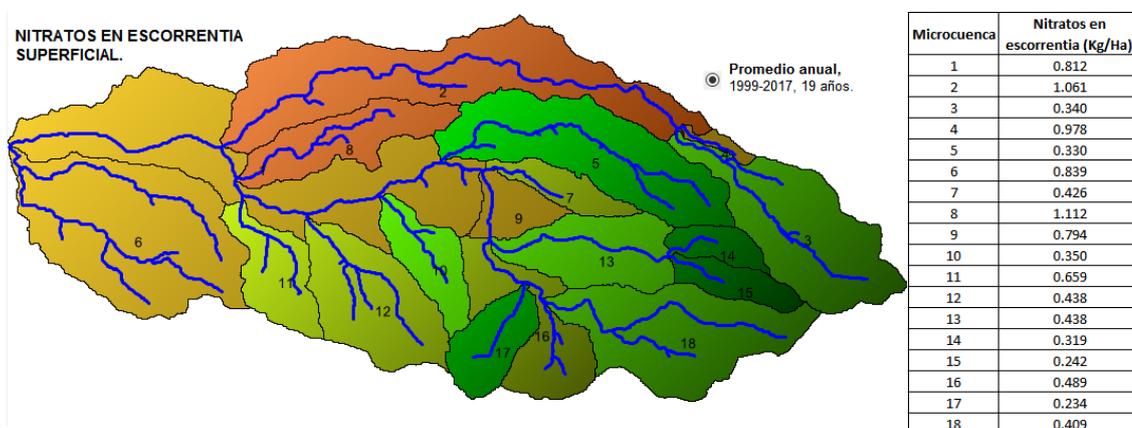


Figura 26. Nitratos en escorrentía superficial por microcuenca. Fuente: Propia.

Los resultados para el ciclo del fósforo se muestran en la Figura 27, este ciclo es de particular interés en las cuencas hidrográficas, debido a que proviene tanto de fuentes orgánicas (ceniza, estiércol) como químicas (comerciales), esto significa que las concentraciones de fósforo en la escorrentía aumentan durante el período de simulación, debido a incrementos en el contenido de fósforo mineral que resultan de la fertilización excesiva con fuentes comerciales y las

modificaciones en la estructura del suelo (compactación), originado por el pisoteo del ganado.

Para el análisis por microcuenca se calculó el promedio anual desde 1999 hasta 2017 de fósforo orgánico, mostrado en la Figura 28 y observándose que, las microcuencas presentan un comportamiento similar que con el nitrógeno orgánico; Santa Teresa (2), El Limonal (8) y Piedras (1) son las mayores productoras de fósforo orgánico, por ser zonas con mayores áreas de cultivo y producción ganadera.

Aunque hay microcuencas con mayor producción de nitrógeno, fósforo orgánico, y nitratos en escorrentía superficial, de acuerdo, a las tablas de la Figura 25, Figura 26 y Figura 28 se observa que son valores relativamente bajos ya que se muestran en unidades de kilogramo por hectáreas (Kg/Ha), y el área de la microcuenca más pequeña (Santa Teresa II) es aproximadamente 29.13 Ha.

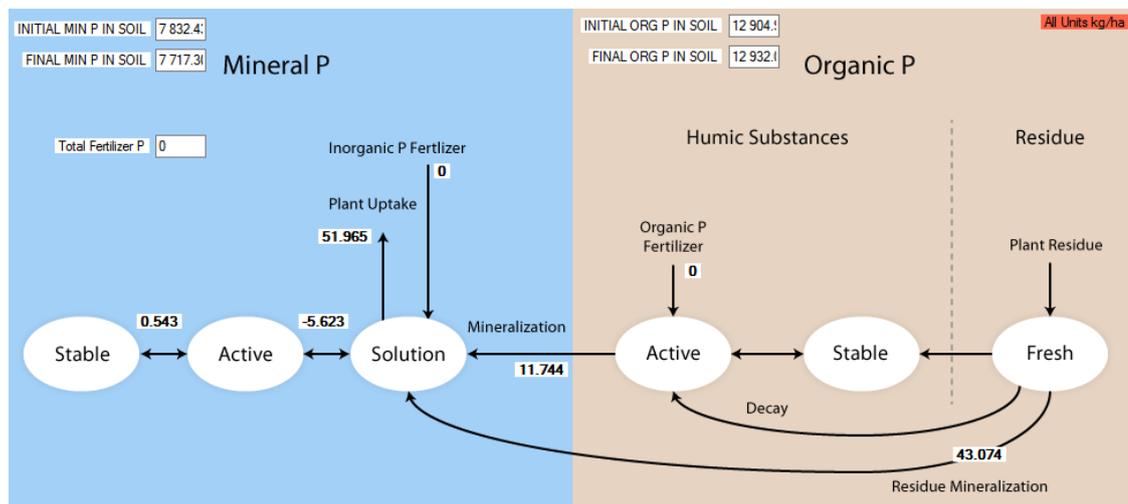


Figura 27. Ciclo del fósforo. Fuente: Propia.

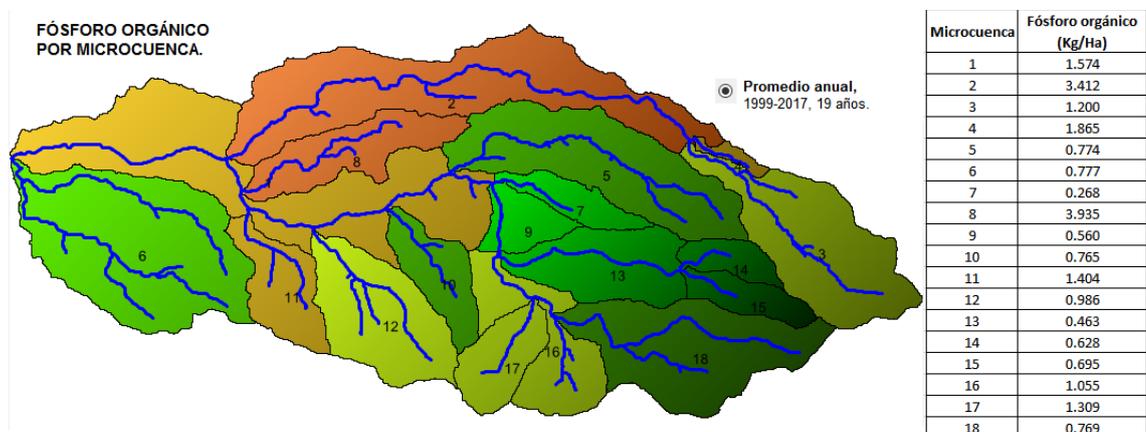


Figura 28. Fósforo orgánico por microcuenca. Fuente: Propia.

En cuanto a la información por pérdida de nutrientes, se presenta en la Figura 29, un resumen de variables importantes para definir la pérdida de nitrógenos y fósforo en la subcuenca, de la cual se observa que la relación de solubilidad del nitrógeno en la escorrentía es baja, que las pérdidas totales de nitrógeno son mayores al 40% del N aplicado y que por las condiciones morfométricas de la subcuenca, que genera un elevado movimiento descendente (tiempo de retención), la pérdida de nitratos es mayor, representando pérdidas económicas para el agricultor por el desperdicio de nutrimentos que no se absorben por las raíces y por la disminución del rendimiento productivo; de igual manera, afecta la salud de los pobladores por la contaminación del cauce principal y los acuíferos.

En la Figura 30, se observan los resultados en promedio anual por microcuenca, observándose resultados similares a la Figura 28

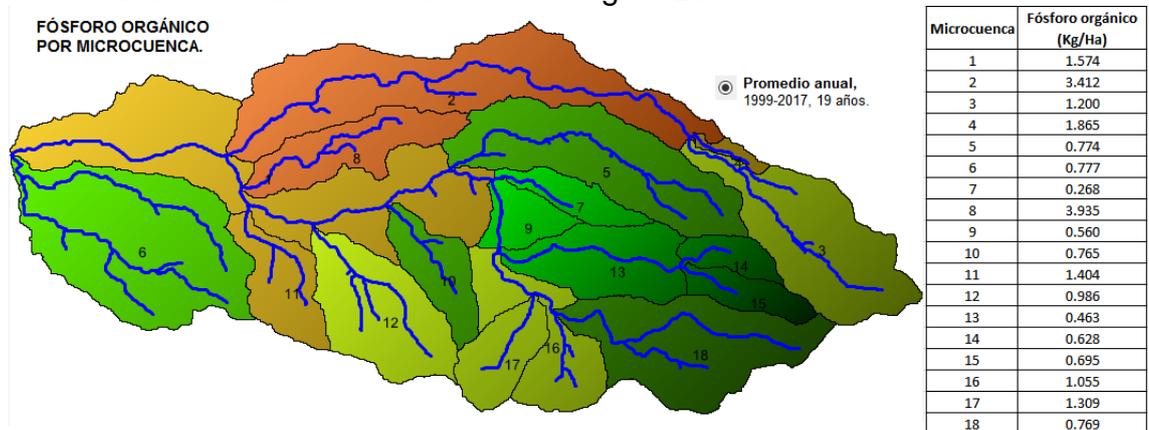


Figura 28, dónde las microcuencas Santa Teresa y El Limonal presentan mayor capacidad de recoger contaminantes del suelo, provenientes de acciones de agentes químicos.

De acuerdo a lo planteado anteriormente, se observa un comportamiento similar en casi las 18 microcuencas, especialmente en Santa Teresa, El Limonal, Piedras y Robles, que son zonas con presencia de cultivos y pastos limpios y en dónde se observan los valores más altos para nitratos, sedimentos, nitrógeno y fósforo orgánico, por el uso constante de fertilizantes y agroquímicos. Aunque son los más altos de las microcuencas, son bajos respecto al área en que se muestran por lo que se considera que para estas variables la calidad del agua es buena.

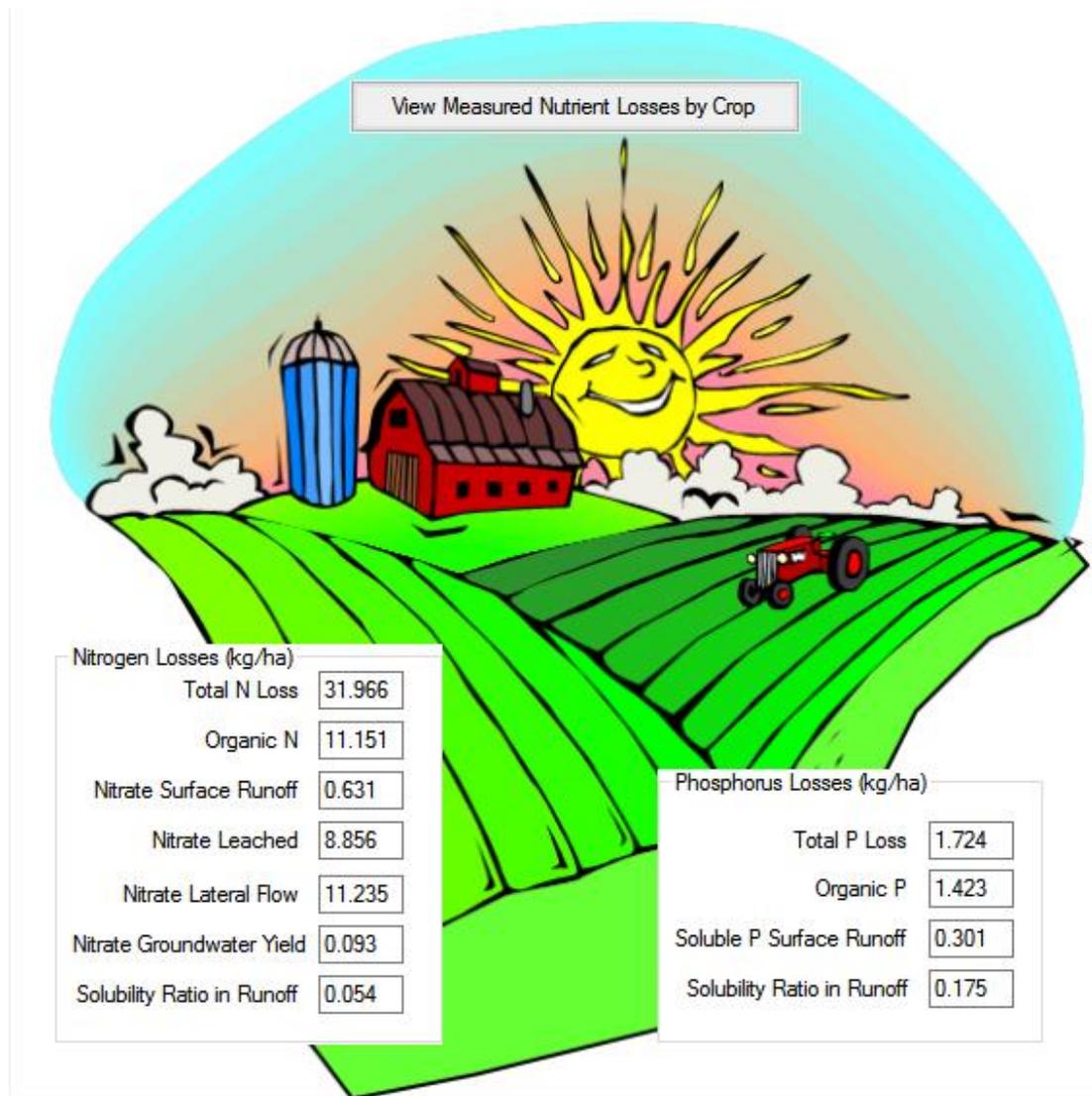


Figura 29. Pérdida de nutrientes. Fuente: Propia.

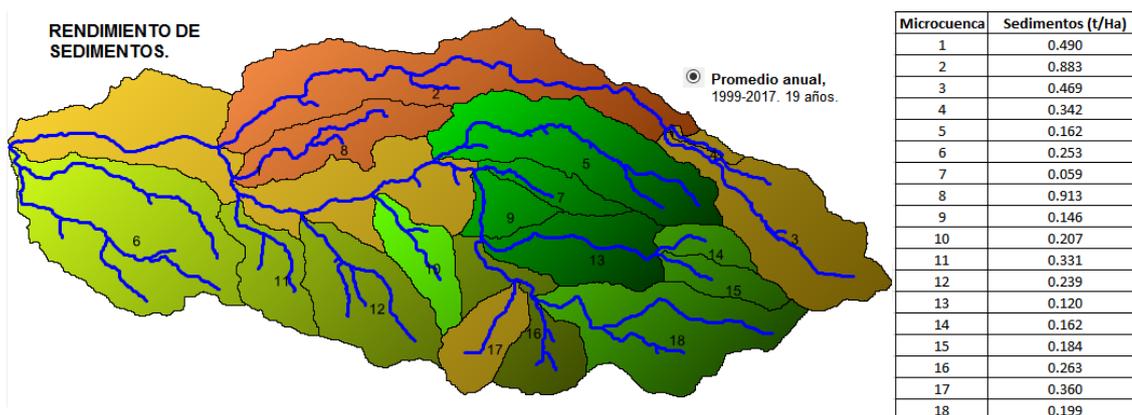


Figura 30. Rendimiento de sedimentos. Fuente: Propia.

4.4 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT.

De la simulación, se extrajeron los valores mensuales de precipitación, desde 1999 hasta 2017, para las microcuencas dónde se encuentran ubicadas las dos estaciones climatológicas utilizadas (Arrayanales y El Diviso). Los resultados se muestran en la siguiente figura y se observa que el modelo realizó una buena simulación de esta variable, presentándose un R^2 cercano a uno.

El modelo hidrológico SWAT para la subcuenca del Río Las Piedras se calibró con caudal debido a que no se contaba con datos de campo de variables como sedimentos, nitratos, o fósforo.

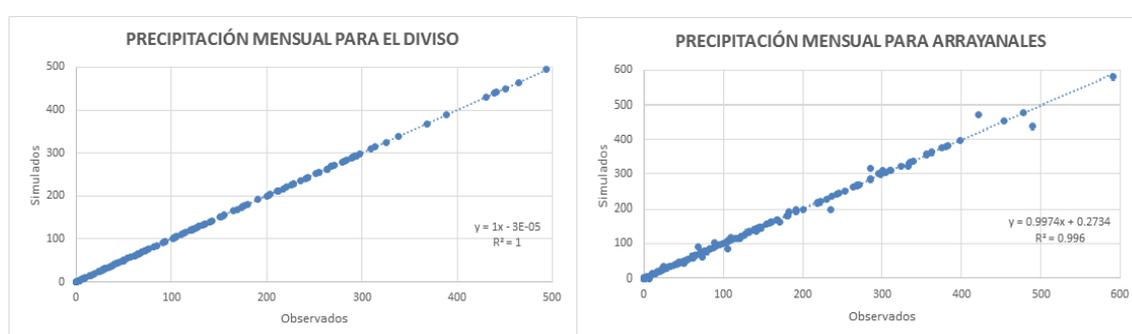


Figura 15. Precipitación observada vs. Simulada. Fuente: Propia.

Se utilizó el algoritmo de análisis de calibración/incertidumbre SUFI2, implementado en SWAT – CUP, y se tuvo en cuenta cuatro parámetros, de acuerdo a la influencia que tiene cada uno sobre el modelo hidrológico. En la Tabla 16 se presentan los parámetros de mayor a menor que, en este caso, tienen influencia en la calibración con caudal y los rangos en que estos oscilaron para realizar cuatro iteraciones de 200 simulaciones cada una.

Tabla 16. Parámetros con mayor influencia.

	PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	PROCESO	RANGO
1	GWQMN	Umbral de profundidad del agua	Flujo base	550-1000
2	Alpha_Bf	Factor de flujo base	Flujo base	0-1
3	Gw_Delay	Retraso en agua subterránea	Flujo base	0-50
4	Cn2	Número de curva de escorrentía	Escorrentía	35-98

Fuente: Propia.

Los valores iniciales de los parámetros, simulados por SWAT, se reemplazaron por los siguientes valores:

- GWQMN: 862.96

- Alpha_Bf: 0.5
- Gw_Delay: 26.86
- Cn2: 45.63

Obteniéndose, nuevos resultados mensuales para caudal, desde enero de 1999 hasta diciembre de 2009, en la Figura 31, se observan los valores mensuales para caudal observado y para la mejor estimación; siendo 1 enero de 1999 y 132 diciembre de 2010; y reportando un coeficiente de determinación $R^2=0.614$, valor satisfactorio según lo reportado por (Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., Hauck, L.M., 2001) (ANEXO 4), este valor obedece a que la simulación se realizó sin tener en cuenta años de calentamiento y en este periodo habían cinco (1999, 2000, 2007, 2008, 2011).

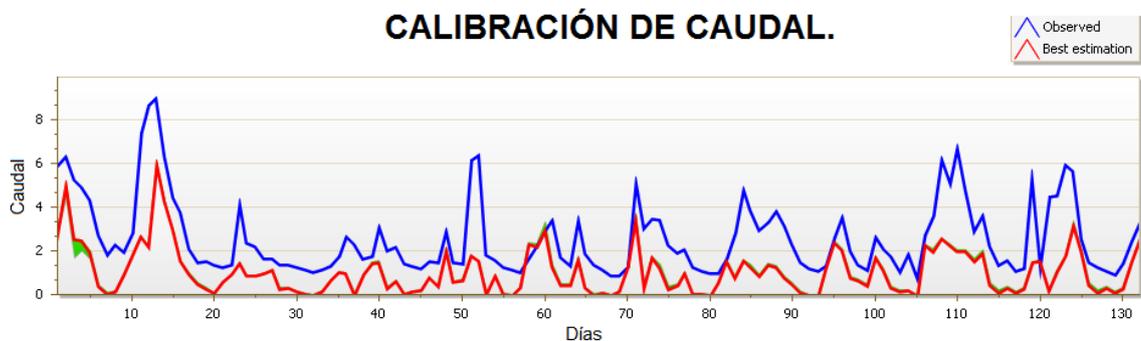


Figura 31. Calibración de SWAT con caudal. Fuente: Propia.

La validación se realizó para los años 2015 y 2016 y los valores más alejados se encuentran en el año 2015 debido a que en este hay fenómeno Niño y durante la simulación no se tuvo en cuenta estos cambios. Es importante mencionar que la disponibilidad de datos climáticos con un registro histórico mínimo de 15 años es clave para mejorar la calibración del modelo, disminuyendo la subestimación de datos simulados.

4.5 GENERACIÓN DE ESCENARIOS

Se generaron tres escenarios, el primero E1, es el escenario base, que muestra las condiciones actuales cuyos resultados se muestran en la sección anterior, el segundo E2, teniendo en cuenta el incremento según prácticas tradicionales con uso de agroquímicos y el tercero E3, por incremento en precipitación según criterios de escenarios de la tercera comunicación de cambio climático¹⁶. Los

¹⁶ Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100.

resultados de cada simulación se presentan a nivel de microcuencas con variables hidrológicas, sedimentos, nitrógeno y fósforo.

4.5.1 SEGUNDO ESCENARIO (E2).

Para este escenario se ingresó información de algunos pesticidas utilizados en las zonas con cultivos (CRC 2016), adicionando los agroinsumos referidos en las casas comerciales para los cultivos de papa, maíz y frijol, conocidos como endosulfan, malathion, asulam sodium salt, dalapon y glyphosate amine; también se ingresaron datos de las prácticas agrícolas (Tabla 17), extendiendo esta información en todas las HRU de las microcuencas.

Tabla 17. Prácticas agrícolas.

MES	PRÁCTICA	DESCRIPCIÓN
Febrero	Tile drains	Sistemas de drenaje
Febrero	Contour planting	Siembra a favor de la pendiente
Marzo	Generic conservation	Prácticas de conservación del suelo
Junio	Fire	Quema
Julio	Fire	Quema
Agosto	Generic conservation	Prácticas de conservación del suelo
Septiembre	Strip cropping	Eras
Noviembre	Filter strip	Canales de desagüe
Diciembre	Residue management	Manejo de herbáceas

Fuente: Propia y SWAT input data (.OPS)

Este escenario se propone teniendo en cuenta la proyección de Mejía Recaman, 2017 correspondiente a la ampliación de las coberturas de cultivos y pastos limpios al año 2040, incrementándose la agricultura convencional la cual es intensiva y conlleva el uso de agroinsumos. La simulación se realizó mensual para un año, con el fin de mostrar la importancia del manejo sostenible de las prácticas productivas en la subcuenca.

Los resultados se muestran por microcuenca, y se calculó el promedio anual para el agua disponible en el suelo como se observa en la tabla de la Figura 32, en este caso Robles (6), El Limonal (8), Santa Teresa (2), Piedras (1) y Carnicerías (11) serían las microcuencas con mayor disponibilidad de agua en el suelo por ser las zonas en donde los pastos limpios y cultivos tendrían mayor extensión. Piedra Negra (15), Las Pavas (3) y La Cabaña (14), son las microcuencas con menor cantidad de agua disponible en el suelo ya que son zonas de conservación y regulación del ciclo hidrológico, con presencia de herbazal denso lo cual distribuye el agua en cauce, subsuelo y acuífero.

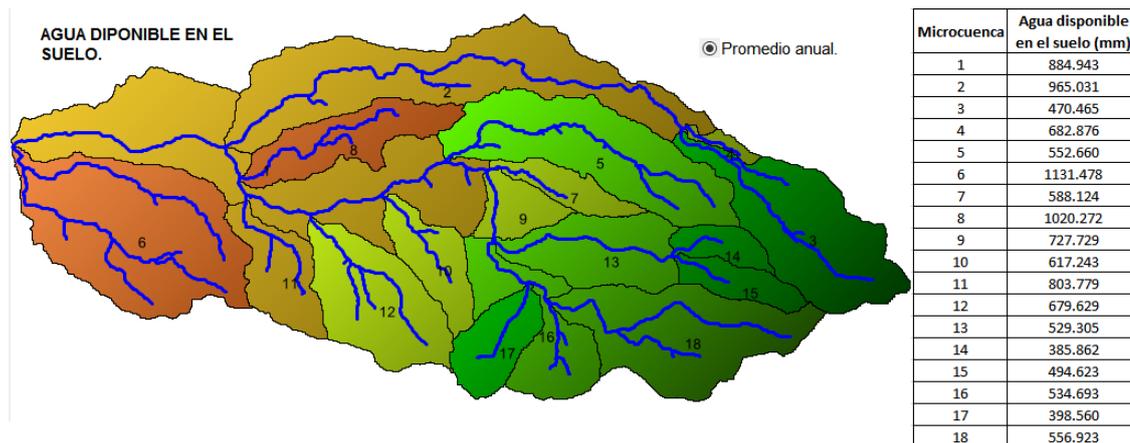


Figura 32. Agua disponible en el suelo para escenario II. Fuente: Propia.

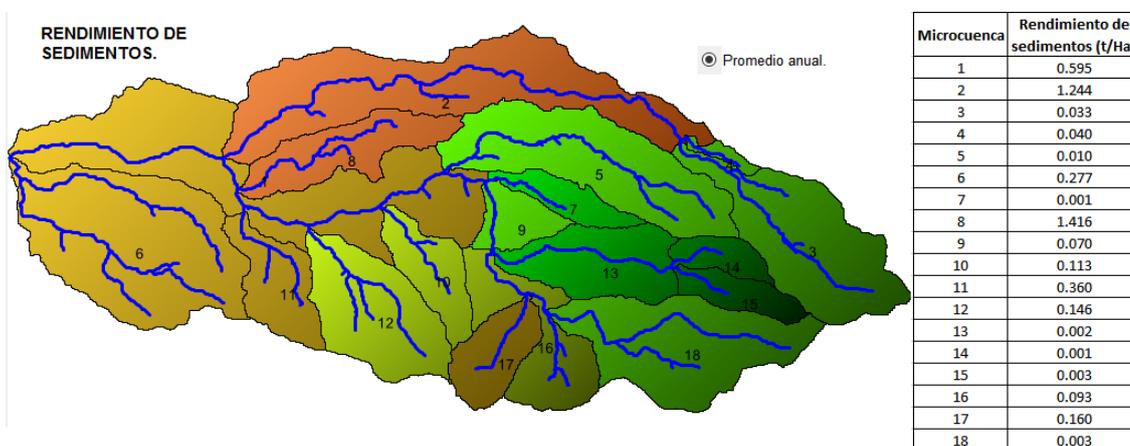


Figura 33. Rendimiento de sedimentos para escenario II. Fuente: Propia.

En cuanto a sedimentos se muestra la Figura 33 y para la contribución en la escorrentía superficial la Figura 41 del ANEXO 5., donde Santa Teresa (2) y El Limonal (8) tienen los valores más elevados y serían las microcuencas con mayor capacidad de recoger contaminantes del suelo como material sólido acumulado sobre la superficie, pesticidas o fertilizantes. Las Pavas (3), Santa Teresa II (4), Aguas Claras (13), La Cabaña (14), Piedra Negra (15) y Peñas Blancas (18) por ser microcuencas en zonas de conservación presentan los niveles más bajos para sedimentos y baja acumulación de contaminantes en el suelo.

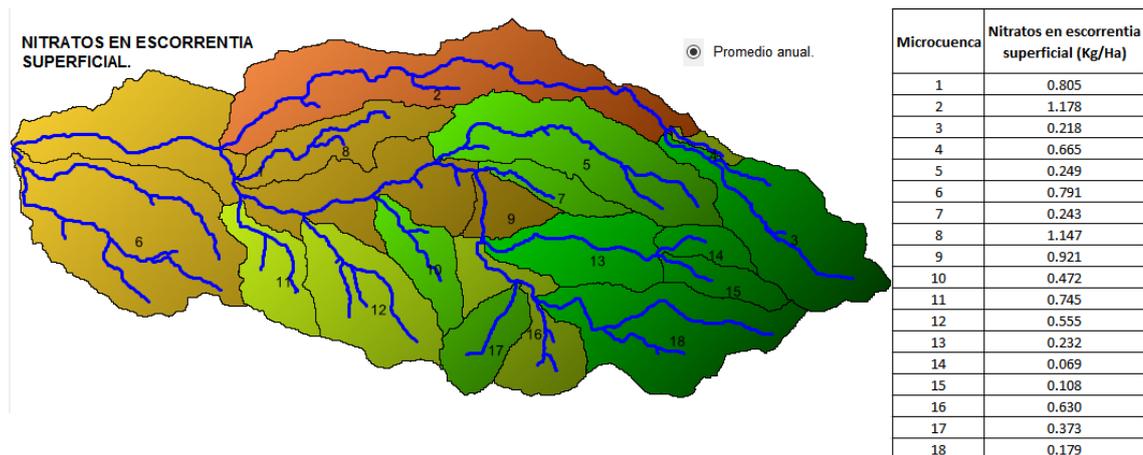


Figura 34. Nitratos en escorrentía superficial para escenario II. Fuente: Propia.

Respecto a los nitratos en escorrentía superficial se muestra la Figura 34 y la Figura 42 del ANEXO 5 para la carga de nitratos en agua subterránea se muestran los resultados por microcuenca. En este caso, Santa Teresa (2) y El Limonal (8) son las microcuencas que tienen los valores más altos, observándose que los nitratos se están eliminando del perfil del suelo, aproximadamente en un 50 %.

De lo descrito anteriormente, se observa que aunque se introdujo un incremento en las zonas de cultivos y pastos limpios para toda la subcuenca, las microcuencas Santa Teresa II (3), La Cabaña (14), Piedra Negra (15) y Peñas blancas (18) cuentan con valores bajos para la mayoría de variables, siendo aún zonas de conservación y con presencia de coberturas como bosques densos o herbazales de tierra firme por lo que el incremento de estas coberturas se presentarían en las microcuencas que desde periodos anteriores cuentan con zonas agrícolas y ganaderas (Santa Teresa, El Limonal, Piedras).

4.5.2 TERCER ESCENARIO (E3).

Para la generación de los resultados de este escenario se modificaron las condiciones climáticas de E1 basado en la generación de escenarios de la tercera comunicación de cambio climático para Colombia y se incrementó en un 20% la precipitación media diaria, teniendo en cuenta la información del año 2013 ya que este fue un año neutro frío. Se escogió un año de transición, porque en estos años se manifiestan las mayores variabilidades con eventos extremos, principalmente lluvia con mayor intensidad.

Los resultados se muestran por microcuenca, para precipitación, disponibilidad de agua en el suelo, escorrentía superficial, sedimentos, nitrógeno y carga de nitrato en aguas subterráneas.

De acuerdo a la Figura 35, se puede notar que el promedio anual por microcuenca, primero incrementa aproximadamente en un 20 % también comparándolo con los resultados del ANEXO 6. en la Figura 43, y segundo, que Santa Teresa II (3), Las Pavas (4), Piedra Negra (15) y Peñas Blancas (18) son las microcuencas que menor precipitación reportan.

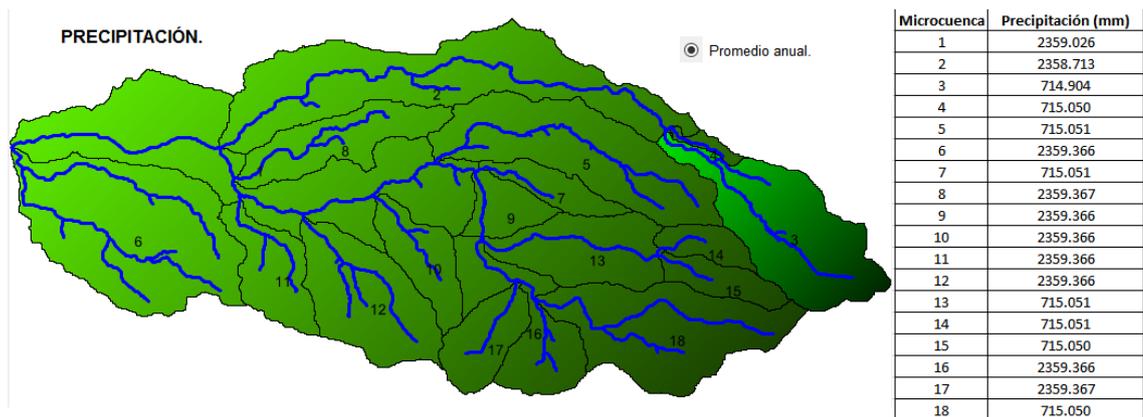


Figura 35. Precipitación para escenario III. Fuente: Propia.

También, aunque se observa un incremento en la precipitación refiriéndose a que hay una cantidad mayor de agua en la subcuenca, ésta se pierde rápidamente debido a que la regulación es poca, cómo se evidencia en la Figura 36, y validando que las microcuencas cercanas a la zona con presencia de ecosistema páramo, siendo zonas de conservación, presentan valores muy bajos cercanos a cero en la contribución de la escorrentía superficial.

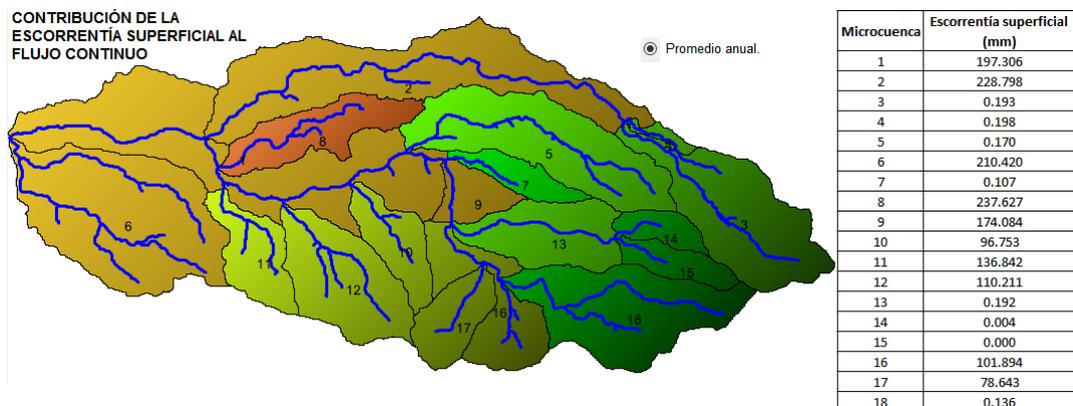


Figura 36. Escorrentía superficial. Fuente: Propia.

Por su parte, teniendo en cuenta la disponibilidad de agua en el suelo que se observa en la Figura 37 y la contribución de la escorrentía superficial (ANEXO 6.

Figura 44), los promedios anuales por microcuenca disminuyeron considerablemente, comparándolos con los resultados para el escenario I; dónde, por el incremento de cultivos y pastos limpios, el agua se encuentra con mayor disponibilidad en el suelo. Se observa también, que El Limonal (8) es la microcuenca que reporta los valores más altos en disponibilidad de agua y contribución de la escorrentía superficial en toda la Subcuenca lo cual puede deberse a la presencia de cultivos permanentes en la zona.

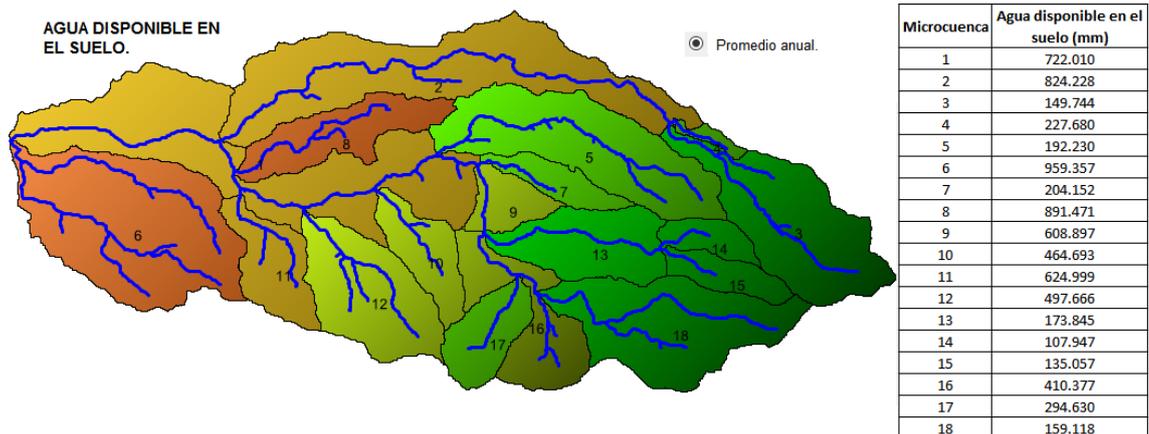


Figura 37. Agua disponible en el suelo para escenario III. Fuente: Propia.

Según la Figura 38 las microcuencas Santa Teresa y El Palmichal son las que tienen mayor rendimiento de sedimentos, en este caso Carnicerías (11) y El Vaho (12) presentan un incremento en sedimentos, comparándolo con los valores de la situación actual de la subcuenca sin el incremento en la precipitación.

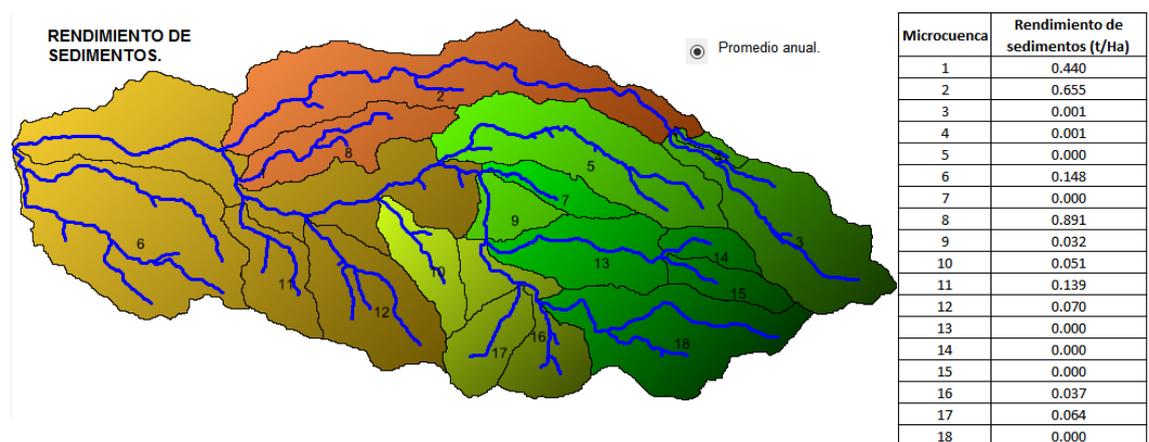


Figura 38. Rendimiento de sedimentos para escenario III. Fuente: Propia.

Por último, los nitratos en escorrentía superficial mostrados en la Figura 39 y la carga de nitratos en la subcuenca que se observan en la Figura 45 del ANEXO

6. son inferiores a 2 kg/Ha, y las microcuencas cercanas al ecosistema páramo presentan valores cercanos a cero, y de acuerdo a los resultados anteriores se presenta un comportamiento similar en las microcuencas Santa Teresa y el Limonal, que son las que presentan mayores resultados en nitratos en escorrentía y carga en nitratos, por ser zonas de cultivos y con presencia ganadera.

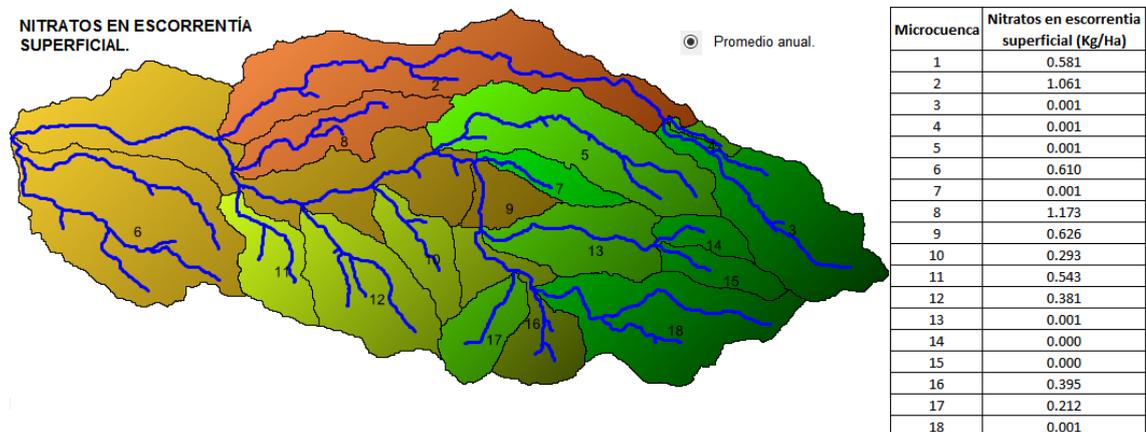


Figura 39. Nitratos en escorrentía superficial para escenario III. Fuente: Propia.

De los resultados obtenidos se observó que para la mayoría de variables, en las microcuencas de la parte media y baja los valores son los más altos de la subcuenca por lo que Santa Teresa (2), El Limonal (8), Piedras (1) y Robles (6) son las más influyentes en la contaminación difusa de la subcuenca debido a que son lugares dónde hay presencia e intervención humana y su principal actividad económica son las prácticas agrícolas: ganadería extensiva y agricultura. Teniendo en cuenta que la subcuenca del río Las Piedras es la principal fuente abastecedora del municipio de Popayán es de gran importancia la medición de las variables fisicoquímicas como parte del conocimiento para la calidad del agua cruda según el Decreto 1594 de 1984 para su potabilización y consumo humano. A su vez, en las microcuencas de la parte alta los valores para contaminación difusa son bajos gracias a la presencia de bosques naturales, ecosistema páramo, arbustales y pastos naturales por lo que es significativo continuar con el proceso de aislamiento y reforestación que se implementa en la subcuenca con ayuda de la fundación Río Las Piedras y el Acueducto y alcantarillado de Popayán S.A E.P.S para garantizar zonas de reservas que ayudan en la recuperación de los espacios naturales y mejoran las condiciones del agua.

CONCLUSIONES

Se logró la estimación de la contaminación difusa por actividades agrícolas, como cultivos y pastos limpios, a partir de variables hidrológicas, información de sedimentos, nitrógeno, fósforo y nitratos, en la subcuenca del río Las Piedras, para el periodo comprendido 1999-2017; teniendo en cuenta información base del mapa de elevación digital – DEM, mapas de uso y de tipo de suelos y una base de datos meteorológicos.

Con información de las imágenes satelitales seleccionadas para este estudio y la clasificación realizada para las 14 coberturas seleccionadas en la subcuenca del río Las Piedras, se logró observar la transición que se presentó hasta Abril de 2017 de los espacios naturales como: pastos naturales, arbustales y bosques; información que fue validada con expertos y líderes comunitarios de la subcuenca. Con este producto fue posible, visualizar, a partir del buffer del cordón ripario la presencia de cultivos y pastos limpios en zonas aledañas al cauce y tributarios principales del río Las Piedras, describiendo y priorizando las fuentes de contaminación no puntual, asociadas a prácticas agrícolas, como agricultura y ganadería.

Se definió el área de la subcuenca y se actualizó la cantidad de microcuencas de 15 a 18, logrando una mejor distribución del área total para el estudio y análisis de zonas y variables de interés. Con esta información y la combinación de los mapas de tipo y de uso de suelo y los rangos de pendientes trabajados fue posible la creación de las unidades de respuesta hidrológica HRU, cuyo análisis permitió examinar las condiciones generales de la subcuenca por su representatividad con respecto al área total; información necesaria para la simulación del modelo hidrológico “Soil and Water Assessment Tool SWAT”. De esta manera, los resultados de la simulación se calibraron y validaron para obtener una mejor aproximación a la realidad, ya que se omitieron ciclos de años de calentamiento y los resultados para caudal presentaban una subestimación con respecto al valor observado, con el fin de poder evaluar la contaminación difusa en la subcuenca del río Las Piedras

La situación actual de la subcuenca del río Las Piedras, presentó valores bajos para variables como sedimentos, nitratos, nitrógeno y fósforo, variables de gran

importancia para determinar la contaminación difusa en una subcuenca donde a partir de esta información, se generaron y analizaron dos posibles tendencias de alta importancia en los procesos de contaminación difusa por actividades agrícolas, teniendo en cuenta dos escenarios: por incremento en las prácticas agrícolas y uso de agroinsumos, así como por el aumento en la precipitación para un año neutro frío. El escenario dos sería el crítico, ya que reportó valores altos en las variables importantes para determinar la contaminación difusa en la subcuenca.

RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

Para analizar con mayor profundidad el proceso de la contaminación difusa en subcuencas con áreas de cultivo inferiores a 10 Ha, se recomienda el uso de imágenes satelitales con resolución espacial mayor y validar esta información con cartografía social, de igual manera, incluir información detallada sobre prácticas de uso y manejo, calendarios productivos e insumos de control y plaga y fertilización aportan mayor precisión.

El modelo hidrológico SWAT, demostró ser un modelo que permite simulaciones a partir de un mínimo de información de base dando buenos resultados, por lo que se recomienda la aplicación del mismo en otras subcuencas, cómo la subcuenca del río Molino y la del río Palacé; que son de gran importancia para Popayán

En el trabajo se realizó la calibración y validación del modelo hidrológico SWAT solamente con resultados de caudal, pero se pueden mejorar si se tienen medidas de variables de interés, cómo sedimentos, escorrentía y nitratos, y de esta manera tener certeza de los resultados para estimar contaminación difusa en la subcuenca.

Dependiendo de la disponibilidad de datos, el modelo es robusto y permite hacer simulaciones precisas de la dinámica de la movilización de nutrientes y de sedimentos en flujo superficial y subterráneo por lo que se recomienda, a partir de los resultados de este estudio incluir registros de nitrógeno, fósforo y nutrientes para disminuir la incertidumbre.

REFERENCIAS

- Acueducto y alcantarillado de Popayán – S.A.S E.P.S. (s. f.). Recuperado de <http://www.acueductopopayan.com.co/gestion-ambiental/fundacion-procuenca-rio-las-piedras/fuentes-de-abastecimiento/cuenca-piedras/>
- Acueducto y alcantarillado de Popayán S.A. (2018). Cuenca Piedras. Recuperado de <http://www.acueductopopayan.com.co/gestion-ambiental/fundacion-procuenca-rio-las-piedras/fuentes-de-abastecimiento/cuenca-piedras/>
- Aguilar, C. (2004). Evaluación de la contaminación difusa en zonas de olivar con diferentes alternativas de manejo del suelo. TPFC. Dpto. Agronomía, Universidad de Córdoba.
- Bautista, D. (2013). Estructuración de un modelo para identificar el impacto de la contaminación de fuentes difusas en la subcuenca de Chapala. Centro interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Michoacán. Instituto Politécnico Nacional.
- Campaz, G., Enríquez, J. (2012). *Simulación de caudales en la subcuenca río las piedras mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT*. Universidad del Cauca.
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos De Teledeteccion Espacial. <https://doi.org/23.304-1995>
- CRC. (2016). Plan de ordenación y manejo de la subcuenca hidrográfica del Río las Piedras (Actualización) Resolución 0751/2006. F. P. R. L. Piedras. Popayán, CRC: 457.
- Dominguez de Franco, V. (2009). *Herramientas para la implementación de un Sistema de Gestión de Cuencas tomando como base de respuesta, la unidad ecosistémica del Río David*, Universidad Tecnológica de Panamá.
- ESA. (s. f.). Sentinel Online. Recuperado de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S., Possingham, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 114(2-4), 369-386.
- GEA, GIT, CIAgua, & C. (2013). Inter-Institutional, Multi-Sectoral Analysis of Vulnerability and Adaptation to Climate Change for the Agricultural Sector in the Upper Cauca River Basin Impacting Adaptation Policies. Popayán.
- GEA. (2012). Modelamiento climático, patrones de cambio y sus efectos en ecosistemas agrícolas altoandinos, identificando medidas de adaptación y mitigación para la planificación. Popayán: Universidad del Cauca - Ministerio

de Agricultura y Desarrollo Rural.

- GEA, E. (2014). Fortalecimiento de los mecanismos de gestión integral del recurso suelo para la producción agrícola sostenible en el departamento del Cauca. Popayán.
- Gonzales, S. (2007). Contaminación difusa de las aguas. INIA. *Tierra Adentro*, 21-25.
- Hernandez, D. (2015). *Estimación de los parámetros morfométricos y las unidades de respuesta hidrológica de la cuenca del Río Ráquira departamento de Boyacá a través del programa SWAT*. Universidad Católica de Colombia.
- Horning, N. (2018). *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10607-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10607-4)
- Landis, J. Richard, Koch, G. G. (1977). The Measurement Of Observer Agreement For Categorical Data., 1, 159-174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Leonard, R.A., Knisel, W.G., Still, D.A. (1987). GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems.
- McElroy, M.B., Kong, Y.L., Nier, A.O. (1977). Composition and Structure of the Martian Upper Atmosphere: Analysis of Results from Viking. *Science, New Series*, 194(4271 (Dec. 17, 1976)), 1295-1298.
- Mejia Recaman, L. (2017). Manejo adaptativo del territorio en una cuenca altoandina desde la diversidad cultural y ecosistémica. Colombia.
- Mosquera, L., M. Polo, E. C. (1986). Clasificación de las tierras por su capacidad de uso.
- NASA. (s. f.). Alaska Satellite Facility. Recuperado de <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/#>
- Novotny, V. (1986). A Review of hydrologic and wáter quality models use for Simulation of Agricultural Pollution. *Agricultural Monpoint Source Pollution: Model Selection and Aplication*. Amsterdam Elsevier.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO). (2006).
- Otero, J.D., Figueroa, A., Muñoz, F. A., Peña, M. . (2011). Loss of soil and nutrients by surface runoff in two agro-ecosystems within an Andean paramo area. *Ecological Engineering*, 37(12), 2035-2043. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.08.001>
- Pencue, E. L., Solano, Y. T., Corrales, J. C., Figueroa, A. (2016). A Semi-

Supervised Hybrid Approach for Multitemporal Multi-Region Multisensor Landsat Data Classification, 9(12), 5424-5435.

Perez, L.E. (2005). Teoría de la sedimentación.

Qunming, W., Peter M., A. (2018). Spatio-temporal fusion for daily Sentinel-2 images, 31-34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.046>

Robinson, D. A., Hockley, N., Cooper, D. M., Emmett, B. A., Keith, A. M., Lebron, I., Reynolds, B., Tipping, E., Tye, A. M., Watts, C. W., Whalley, W. R., Black, H. I. J., Warren, G. P. y Robinson, J. S. (2013). Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation. *Soil Biology and Biochemistry*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.09.008>

Ruiz, D. M., Martínez, J. P., Otero, J. D., Figueroa, A. (2017). Effects of productive activities on the water quality for human consumption in an Andean basin, a case study. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 33(3), 361-375. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.03.01>

Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., Hauck, L.M. (2001). Validation of the SWAT model on a large RWER basin with point and nonpoint sources 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37 (5), 1169-1188.

Secretaria de Desarrollo Agropecuario y Fomento Económico. (s. f.). Recuperado de <http://cauca.gov.co/secretarla-de-desarrollo-agropecuario-y-fomento-economico>

SERCP. (s. f.). Copernicus Open Access Hub. Recuperado de <https://scihub.copernicus.eu/>

Urrutia Rivas, M. A. (2016). Aplicación Del Modelo Swat Para La Simulación Del Ciclo Hidrológico De La Cuenca Alta Del Rio San Juan Bajo La Influencia De La Actividad Minera. *Tesis de grado*, (1), 79.

Van der MeerH, F. D., van der WerffF, H. M. A., van Ruitenbeek, F. J. A. (2014). Potencial of ESA's Sentinel-2 for geological applications, 124-133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.022>

WI. (2013). *State of the World 2013: Is Sustainability Still Possible?* Washington, DC.: Island Press.

WI. (2015). *State of the World 2015: Confronting Hidden Threats to Sustainability*. Washington, D.C: Island Press.

Zuñiga, O., Uribe, A., Torres, A., Cuero, R., Peña, J. (2013). Implications of land-cover types for soil erosion on semiarid mountain slopes: Towards sustainable land use in problematic landscapes. *Agronomía Colombiana*, 112-119.

ANEXOS

ANEXO 1. Modelos para evaluar contaminación difusa.

Tabla 18. Modelos para evaluar la contaminación de fuentes agrícolas no localizadas.

NOMBRE	APLICACIÓN	ESCALA DE TIEMPO
a. Nivel medio-bajo de necesidad de datos		
Cargas por superficie unitaria (predicción estadística)	Pérdida de sedimentos; pérdida de nutrientes	Promedios a largo plazo
<i>NOTA: Los modelos estadísticos utilizan datos agregados para situaciones comparables. La capacidad de predicción es baja, pero puede ser útil como medio de detección en los casos en que no se dispone de datos sobre los campos de cultivo o la escala espacial es tan grande que resulta antieconómico obtenerlos</i>		
USLE (Ecuación universal de pérdida de suelo)	Pérdida media de suelo en relación con cultivos específicos, etc.	Anual
RUSLE/MUSLE (USLE revisada/modificada)	Pérdida media de suelo en relación con cultivos específicos, etc.	Anual
<i>NOTA: Los modelos empíricos semejantes al USLE se han aplicado en el análisis de grandes superficies, utilizando, por ejemplo, datos obtenidos con sistemas de teledetección, para elaborar estimaciones regionales de las pérdidas de suelos (por ejemplo, en Brasil). Estos modelos se incorporan muchas veces en los modelos hidrológicos más detallados que se indican a continuación</i>		
b. Modelos que requieren gran disponibilidad de datos (orientados en el proceso)		
ACTMO (Modelo de transporte de productos químicos agrícolas)	Procesos hidrológicos, calidad del agua	Suceso aislado, continuada
AGNPS (Contaminación de fuentes agrícolas no localizadas)	Hidrología, erosión, N, P y plaguicidas	Suceso aislado diariamente, continuada
ANSWER (Simulación de respuestas ambientales en cuencas hidrográficas de fuentes zonales no localizadas)	Hidrología, erosión, N, P y plaguicidas	Una tormenta
CREAMS (Erosión química y escorrentía de los sistemas de ordenación agrícola)	Hidrología, erosión, N, P y plaguicidas	Diaria, continuada
EPIC (Calculador del efecto erosión-productividad)	Hidrología, calidad del agua en relación con contaminantes orgánicos, tóxicos y convencionales	Suceso aislado, diaria, continuada
HPSF (Programa Fortran de simulación hidrológica)	Hidrología, calidad del agua en relación con contaminantes tóxicos y convencionales	Suceso aislado, diaria, continuada

SHE (Sistema hidrológico europeo)	Hidrología, con módulos de calidad del agua	Suceso aislado, diaria, continuada
SWAM (Modelo de cuencas hidrográficas pequeñas)	Procesos hidrológicos, sedimentos, nutrientes y plaguicidas	Diaria, continuada
SWAT (Instrumento de evaluación de suelos y aguas)*	Procesos hidrológicos, sedimentos, nutrientes, y plaguicidas	Suceso aislado, diaria y continuada
SWRRB (Simulador para recursos hídricos en cuencas rurales)	Balance hídrico y procesos hidrológicos y sedimentación	Suceso aislado, diaria, continuada
WEPP (Proyecto de predicción de la erosión hídrica)	Procesos hidrológicos, procesos de sedimentación	Tormenta diaria, continuada

*Modelo escogido para la elaboración de esta investigación

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura (FAO, 1997)

ANEXO 2. Perfiles de suelos.

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Consociación	Pendiente	Unidad Cartográfica	Grupo hidrológico	Profundidad máxima	Textura	Profundidad (mm)	Densidad aparente (g/cm ³)	Agua aprovechable en el suelo	Conductividad hidráulica	M.O (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	K
Aquandic Cryaquent	12	LDLc	B	2000	Sandy loam	0-60	1.68	0.09	62.00	7.31	5.68	10.70	83.60	0.01
						60-190	1.60	0.08	31.20	2.66	9.68	6.72	83.60	0.01
						190-600	1.56	0.09	21.80	0.44	11.70	8.70	79.60	0.02
						600-950	1.46	0.09	7.10	0.32	19.70	12.70	67.60	0.04
						950-X	1.49	0.09	9.10	0.32	17.70	10.70	71.60	0.04
Typic Cryaquents	25	LDLcd	B	2000	Sandy loam	00-330	1.67	0.08	59.90	7.76	5.70	12.70	81.60	0.01
						330-700	1.52	0.10	15.80	1.46	13.70	14.70	71.60	0.03
						700-1150	1.59	0.08	29.70	0.43	9.70	12.70	77.60	0.04
						1150-X	1.34	0.13	3.80	0.16	29.70	34.70	35.60	0.04
						00-400	1.66	0.10	53.50	19.50	5.68	20.70	73.60	0.03
Typic Hapludans	12	LVMLc	B	2000	Sandy loam	500-680	1.75	0.07	99.70	8.30	3.68	6.72	89.60	0.00
						680-X	1.67	0.08	58.20	1.08	5.68	14.70	79.60	0.01
						00-450	1.65	0.09	52.40	6.25	6.40	13.30	80.30	0.01
Aquatic Endoaquepts	25	LCCPc	B	2000	Sandy loam	450-770	1.61	0.09	36.90	2.31	8.40	13.30	78.30	0.01
						770-X	1.50	0.10	14.50	0.64	14.40	23.30	62.30	0.04
						00-460	1.65	0.09	51.00	14.40	6.40	15.30	78.30	0.01
Vitric Hapludans	12	LRMLc	B	2000	Sandy loam	460-830	1.71	0.08	76.30	5.24	4.40	9.28	83.30	0.01
						830-X	1.72	0.08	81.30	1.82	4.40	9.28	86.30	0.01
						00-400	1.68	0.09	64.40	12.30	5.12	14.60	80.32	0.01
Typic Hapludans	7	LRMLb	B	2000	Sandy loam	400-790	1.69	0.08	69.10	7.92	5.12	10.60	84.30	0.01
						790-1000	1.69	0.08	69.10	2.57	5.12	10.60	84.30	0.01
						1000-X	1.64	0.09	47.70	1.44	7.12	10.60	82.30	0.01
						00-230	1.69	0.09	66.70	20.30	5.12	12.60	82.30	0.01
Typic Fulvudans	12	LEDFc	B	2000	Sandy loam	230-780	1.77	0.08	99.80	9.10	3.12	10.60	86.30	0.01
						780-X	1.72	0.07	85.10	2.83	4.40	7.30	88.30	0.00
						0-720	1.72	0.07	82.40	9.20	4.40	8.70	86.90	0.01
Pachid Vitric Melanudar	25	LRMLd	B	2000	Sandy loam	720-930	1.72	0.07	82.40	3.96	4.40	8.70	86.90	0.01
						930-X	1.66	0.08	56.00	1.39	6.40	8.70	84.90	0.01
						00-360	1.65	0.09	51.40	9.52	6.40	14.70	78.90	0.01
Andic Haplumbrepts	50	LDLcf	B	2000	Sandy loam	360-640	1.71	0.09	72.70	5.78	4.40	14.70	80.90	0.01
						640-930	1.43	0.10	55.00	1.50	22.40	18.70	58.90	0.03
						930-X	1.47	0.09	84.00	0.91	18.40	12.70	68.90	0.04
						00-290	1.65	0.09	52.80	3.05	6.40	12.70	80.90	0.01
Entic Haplumbrepts	4	LCCPb	B	2000	Loamy sand	290-750	1.60	0.09	35.80	1.92	8.40	16.70	74.90	0.03
						750-820	1.65	0.09	52.80	11.80	6.40	12.70	80.90	0.01
						820-1400	1.66	0.08	53.80	6.74	6.40	11.30	82.30	0.01
						1400-X	1.55	0.10	14.40	0.90	14.40	19.30	66.30	0.03
Typic Hapludans	75	LVMLf	B	2000	Sandy loam	00-350	1.72	0.08	81.30	13.70	4.40	9.30	86.30	0.01
						350-740	1.72	0.07	85.10	4.81	4.40	7.30	88.30	0.00
						740-X	1.49	0.09	10.00	1.01	16.40	15.30	68.30	0.03

Typic Hapludans	12	LVMLd	B	2000	loamy sand	00-700	1.73	0.08	89.10	11.02	4.40	5.30	90.30	0.00
						700-1020	1.72	0.08	83.00	4.44	4.40	9.30	86.30	0.01
						1020-X	1.54	0.09	19.32	1.17	12.40	15.30	72.30	0.03
Entic Haplumbrepts	4	LCCPd	B	2000	Sandy loam	00-290	1.65	0.09	52.80	3.05	6.40	12.70	80.90	0.01
						290-750	1.60	0.09	35.80	1.92	8.40	16.70	74.90	0.03
						750-820	1.65	0.09	52.80	11.80	6.40	12.70	80.90	0.01
						820-1400	1.66	0.08	53.80	6.74	6.40	11.30	82.30	0.01
						1400-X	1.51	0.10	14.40	0.90	14.40	19.30	66.30	0.03
Aquandic Endoaquept	25	LCCPf	B	2000	Sandy loam	00-450	1.65	0.09	52.40	6.25	6.40	13.30	80.30	0.01
						450-770	1.61	0.09	36.90	2.31	8.40	13.30	78.30	0.01
						770-X	1.50	0.10	14.50	0.64	14.40	23.30	62.30	0.04
Typic fulvudans	12	LEDFd	B	2000	Sandy loam	00-230	1.69	0.09	66.70	20.30	5.12	12.60	82.30	0.01
						230-780	1.77	0.08	99.80	9.10	9.10	10.60	86.30	0.01
						780-X	1.72	0.07	85.10	2.83	2.83	7.30	88.30	0.00
Vitric Hapludans	12	LRMLF	B	2000	Sandy loam	00-460	1.65	0.09	51.00	14.40	6.40	15.30	78.30	0.01
						460-830	1.71	0.08	76.30	5.24	4.40	9.28	83.30	0.01
						830-X	1.72	0.08	81.30	1.82	4.40	9.28	86.30	0.01
Achuc vitric melanudar	25	LRMLg	B	2000	Sandy loam	00-360	1.72	0.08	86.20	15.70	4.40	6.70	88.90	0.01
						360-720	1.72	0.07	82.40	9.20	4.40	8.70	86.90	0.01
						720-930	1.72	0.07	82.40	3.96	4.40	8.70	86.90	0.01
						930-X	1.66	0.08	56.00	1.39	6.40	8.70	84.90	0.01
Typic Distrandept	3	LVATb	B	450	Sandy loam	00-450	1.56	0.10	27.00	8.24	10.00	22.00	68.00	0.03
Typic Distrandept	3	LVATc	B	450	Sandy loam	00-450	1.56	0.10	27.00	8.24	10.00	22.00	68.00	0.03
Dytric Cryandept	12	HPMACc	B	1500	Sandy loam	00-300	1.70	0.11	64.70	7.89	4.00	24.00	72.00	0.0250
						300-650	1.71	0.1	67.1	4.66	4	22	74	0.0250
						650-1000	1.57	0.09	27.50	6.98	10.00	18.00	72.00	0.0250
						1000-1500	1.53	0.1	20.1	4.37	12	22	66	0.0250
Dytric Cryandept	12	HPMAd	B	1500	Sandy loam	00-300	1.70	0.11	64.70	7.89	4.00	24.00	72.00	0.0250
						300-650	1.71	0.1	67.1	4.66	4	22	74	0.0250
						650-1000	1.57	0.09	27.50	6.98	10.00	18.00	72.00	0.0250
						1000-1500	1.53	0.1	20.1	4.37	12	22	66	0.0250
Andic Haplumbrepts	50	LDLCb	B	2000	Sandy loam	00-360	1.65	0.09	51.40	9.52	6.40	14.70	78.90	0.0110
						360-640	1.71	0.09	72.7	5.78	4.4	14.7	80.9	0.0110
						640-930	1.43	0.10	55.00	1.50	22.40	18.70	58.90	0.0330
						930-X	1.47	0.09	84	0.91	18.4	12.7	68.9	0.0360

Fuente: Simulación de caudales en la subcuenca río Las Piedras mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT (2012)

ANEXO 3. Datos estadísticos.

Tabla 19. Datos estadísticos de estaciones Arrayanales y El Diviso.

ARRAYANALES												
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
PRECIPITACIÓN	140	155.2	144	197.44	97.89	48.36	40.03	23.94	60.52	201.96	254.25	218.65
DESV. ESTANDAR	122.76	124.12	125.04	123.03	66.1	51.36	78.11	29.15	64.77	107.19	163.01	105.36
TEMPERATURA MÁXIMA	20.65	20.55	20.58	20.86	20.98	19.94	20.44	20.99	20.25	19.84	19.29	19.34
DESV. ESTANDAR	4.01	3.69	3.75	3.53	3.8	3.37	2.98	2.97	3.38	3.3	3.04	3.21
TEMPERATURA MÍNIMA	10.91	11.24	11.43	11.07	11.25	10.81	10.85	11.05	11.67	10.84	10.89	10.81
DESV. ESTANDAR	4.2	4.06	3.98	3.48	3.41	3.57	3.4	3.71	6.67	3.81	3.57	3.83
COEFICIENTE DE SESGO	1.9	1.31	1.73	0.1	1.31	0.94	2.97	1.06	1.55	-0.08	0.5	0.26
NÚMERO DE DÍAS DE PRECIPITACIÓN	10.78	13.71	11.05	12.43	8.67	6.68	5.24	8.58	6.69	13.21	13.19	12.56
PROBABILIDAD DE UN DÍA HÚMEDO DESPUÉS DE UNO SECO	0.33	0.22	0.26	0.33	0.17	0.16	0.07	0.07	0.13	0.23	0.39	0.52
PROBABILIDAD DE UN DÍA HÚMEDO DESPUÉS DE UNO HÚMEDO	0.65	0.67	0.63	0.65	0.62	0.56	0.28	0.28	0.54	0.75	0.77	0.76
EL DIVISO												
PRECIPITACIÓN	166.82	175.95	158.8	186.66	133.92	56.08	38.84	26.36	51.76	164.27	220.66	206.71
DESV. ESTANDAR	129.98	124.45	120.06	118.25	94.36	41.49	45.3	30.59	46.88	125.64	120.43	138.23
TEMPERATURA MÁXIMA	20.86	20.56	20.09	19.96	20.71	19.67	19.63	19.87	20.25	19.43	19.54	20.63
DESV. ESTANDAR	2.61	2.11	2.35	2.08	1.42	1.39	1.33	1.49	1.35	1.21	1.08	2.74
TEMPERATURA MÍNIMA	10.53	10.07	10.58	10.92	11.31	11.08	10.94	10.99	10.76	10.88	10.75	11.76
DESV. ESTANDAR	1.34	1.15	0.53	0.52	0.75	1.15	1.36	1.37	1.48	0.83	0.89	2.91
COEFICIENTE DE SESGO	0.8	1.15	0.69	1.35	0.13	0.91	1.87	1	0.42	0.62	-0.05	0.19
NÚMERO DE DÍAS DE PRECIPITACIÓN	12.86	14.34	13.18	12.29	10.57	9.16	5.63	11.29	9.72	14.78	18.38	15.32
PROBABILIDAD DE UN DÍA HÚMEDO DESPUÉS DE UNO SECO	0.32	0.26	0.34	0.37	0.31	0.16	0.08	0.09	0.19	0.43	0.51	0.38
PROBABILIDAD DE UN DÍA HÚMEDO DESPUÉS DE UNO HÚMEDO	0.67	0.65	0.63	0.67	0.6	0.52	0.35	0.27	0.49	0.71	0.76	0.74

Fuente: Propia.

ANEXO 4. Calibración.

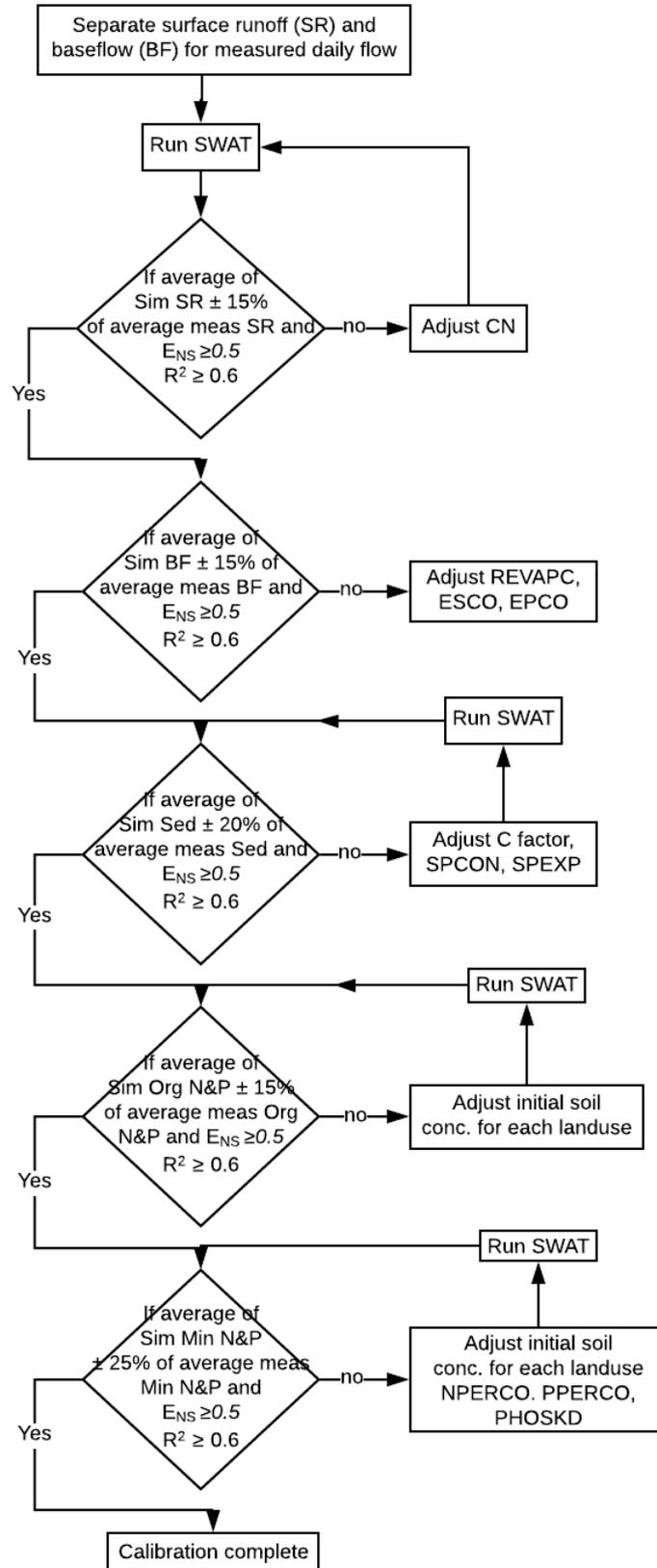


Figura 40. Calibración del modelo hidrológico SWAT. Fuente: Journal of the American Water Resources Association.

ANEXO 5. Mapas para escenario II.

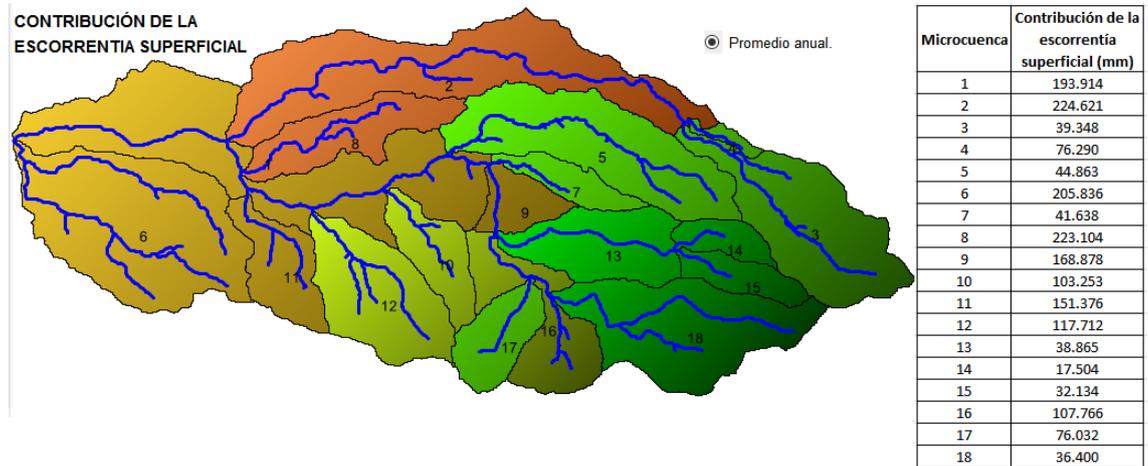


Figura 41. Contribución de la escorrentía superficial para escenario II. Fuente: Propia.

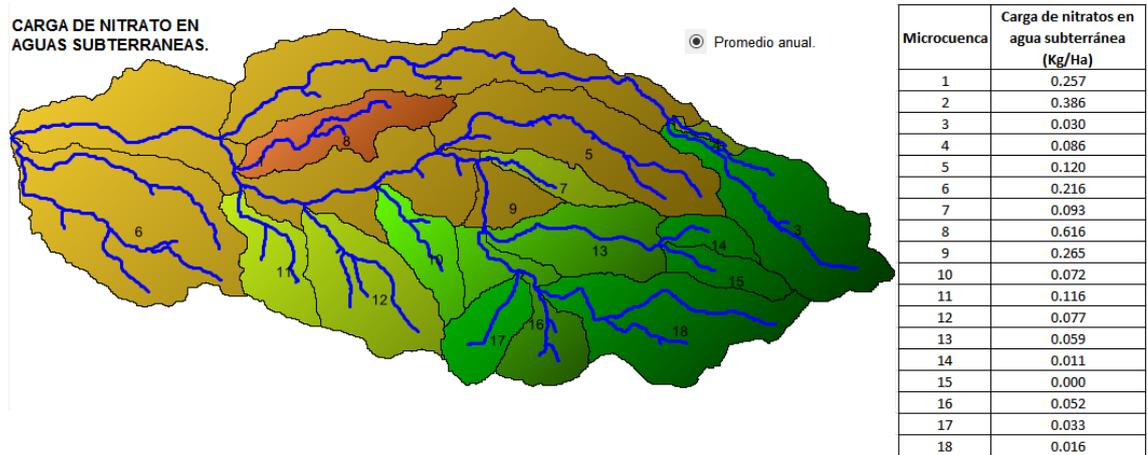


Figura 42. Carga de nitrato en aguas subterráneas para escenario II. Fuente: Propia.

ANEXO 6. Mapas para escenario III.

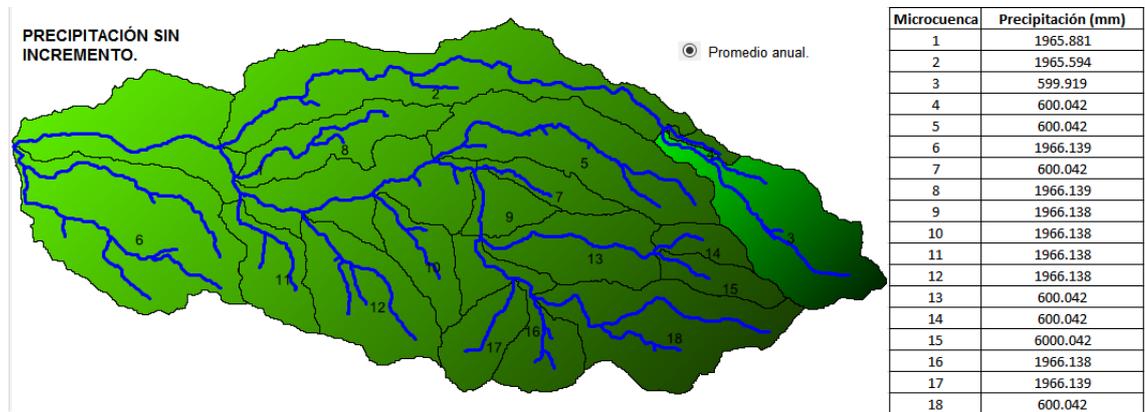


Figura 43. Precipitación sin incremento. Fuente: Propia.

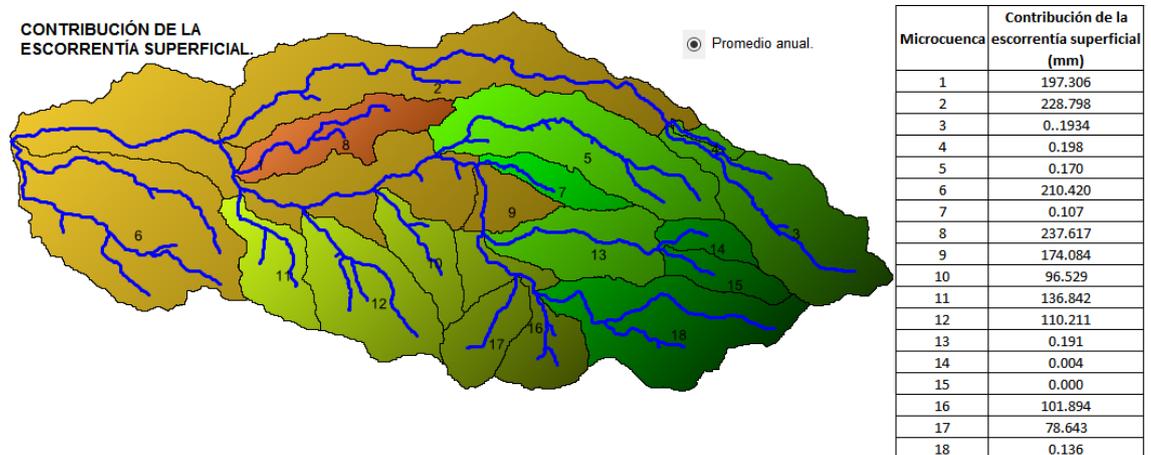


Figura 44. Contribución de la escorrentía superficial para escenario III. Fuente: Propia.

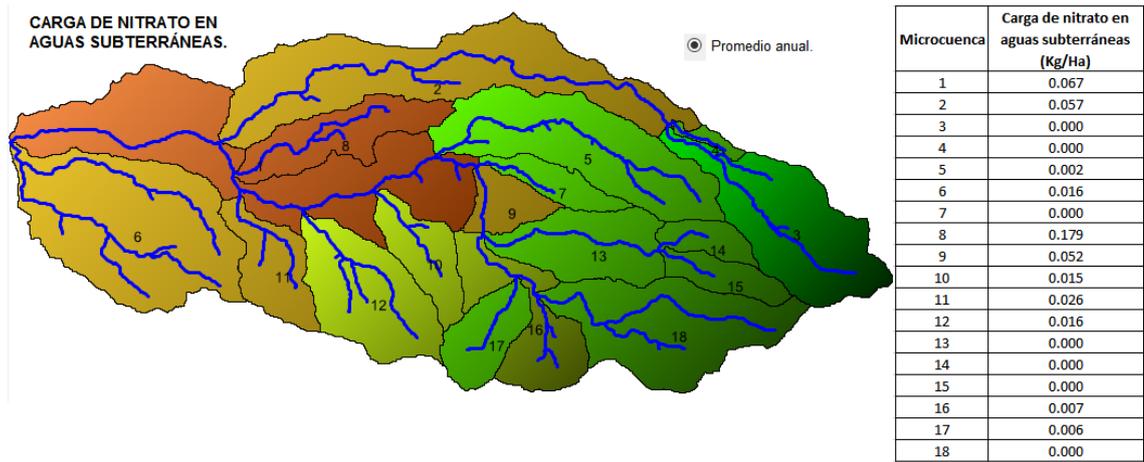


Figura 45. Carga de nitrato en aguas subterráneas para escenario III. Fuente: Propia.