

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA MICROCUENCA QUEBRADA  
MIJITAYO, MUNICIPIO DE PASTO, DEPARTAMENTO DE NARIÑO**

**Ivan Darío Guerrero M.**

**Luis Jamy Ruano G.**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL  
SAN JUAN DE PASTO**

**2018**

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA MICROCUENCA QUEBRADA  
MIJITAYO, MUNICIPIO DE PASTO, DEPARTAMENTO DE NARIÑO**

**Ivan Darío Guerrero M.**

**Luis Jamy Ruano G.**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero agroforestal**

**Asesor:**

**David Andrés Calvache M.**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROFORESTAL  
SAN JUAN DE PASTO**

**2018**

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

Las ideas y conclusiones aportadas en este Trabajo de Grado son Responsabilidad de los autores.

Artículo 1 del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966, emanado por el Honorable Concejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

San Juan de Pasto, Mayo de 2018

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Nariño por permitirnos la formación como profesionales con excelencia y calidad.

A la Facultad de Ciencias Agrícolas, y a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron en nuestra formación académica e investigativa.

Ing. David Andrés Calvache, docente de la Universidad de Nariño, por su dirección y apoyo como presidente de tesis.

M.Sc. Geovanny Solarte Guerrero, docente de la Universidad de Nariño, por su disposición, asesoría y colaboración en el estudio realizado.

Ph.D Hugo Ferney Leonel, decano de la Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, por su asesoría durante el transcurso de esta investigación.

A todas las personas que nos brindaron su apoyo y contribuyeron con sus aportes a la consecución de este logro.

## DEDICATORIA

A Dios, por darme fe, fortaleza y por iluminar siempre mi camino.

A mi Padre, aunque ya no estés, siempre serás mi ejemplo a seguir y te llevare en mi corazón por el resto de mi vida.

A mi Madre con mucho amor, por siempre guiarme por el camino correcto y ser un gran apoyo en todo mi proceso universitario.

A mis hermanos, por acompañarme en todo mi proceso universitario y siempre motivarme para seguir adelante.

A mi novia, por ser mi apoyo incondicional en cada etapa de este proceso y de todas las metas que me propongo.

A mis amigos, por compartir alegrías en cada momento de nuestra carrera universitaria.

Ivan Guerrero.

A Dios, por brindarme fe, sabiduría, fortaleza y guiarme en este camino.

A mis padres por su apoyo incondicional, esfuerzo, dedicación, amor y comprensión; los cuales se han convertido en el motor y mi motivación para seguir este proceso y ser una gran persona y profesional.

A mis hermanos, mis abuelos, los cuales me han brindado su apoyo y acompañamiento en todo este proceso.

A todos mis amigos que me acompañaron en esta formación, los cuales compartidos muchos momentos de alegría.

Luis Ruano.

## RESUMEN

Comprender el funcionamiento hidrológico de una cuenca es un tema esencial a la hora de planificar la conservación del recurso hídrico. Este estudio de modelación hidrológica se realizó en la microcuenca Mijitayo, localizada geográficamente a 1°13'27,2" LN y 77°17'09"LO. El objetivo fue modelar hidrológicamente la microcuenca, calibrar y validar el modelo; y proponer una alternativa agroforestal para un uso adecuado del suelo y conservación del recurso hídrico. Para ello, se utilizó el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), el cual contiene herramientas que permite evaluar el comportamiento del caudal, determinando los caudales observados y simulados. La modelación arrojó un desempeño aceptable con un  $R^2=0,6$ , NSE=0,35 y PBias= -12,30%; sin embargo, se realizó la calibración a los parámetros más sensibles, obteniendo valores ajustados de  $R^2=0,82$ , PBias= -8.70% y NSE = 0.68; y para la validación, se obtuvo un desempeño muy bueno por parte del modelo SWAT con un  $R^2=0,85$ , NSE = 0.72 y PBias = -9.20%; donde los caudales simulados son similares a los caudales observados, mostrando una mayor bondad de ajuste para el modelo. Finalmente, como alternativa agroforestal se propone la implementación de cercas vivas multiestrato con especies aliso (*Alnus jorullensis* H.B.K.), pumamaque (*Oreopanax discolor* (Kunth) Decne. & Planch.) y sauco (*Sambucus nigra* L.) con el fin de contribuir a un uso adecuado del suelo y conservación del recurso hídrico. Se concluye, que la modelación del recurso hídrico en la microcuenca Mijitayo presento resultados estadísticos satisfactorios, sin embargo, es necesario la calibración y validación para que el modelo tenga mayor bondad de ajuste y así determinar con mayor exactitud el comportamiento hidrológico de la microcuenca.

**Palabras clave:** Calibración, cobertura, SWAT, agroforestería, validación.

## ABSTRACT

Understanding the hydrological functioning of a watershed is an essential issue when planning the conservation of hydric resources. This study of hydrological modeling was done in the Mijitayo micro watershed, located geographically at 1°3'27.2 "N and W 77°17'09" W. The objective was to hydrologically model the microwatershed, calibration and validation of the model; and propose an agroforestry alternative for an adequate use of the soil and conservation of the hydric resource. To this, the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) was used, which contains tools to review the compartment of the flow, determining the observed and simulated flows. As result, it was obtained that the modeling showed an acceptable performance with  $R^2 = 0.6$ ,  $NSE = 0.35$  and  $PBias = -12.30\%$ ; however, the calibration was done to the most sensitive parameters, obtaining adjusted values of  $R^2 = 0.82$ ,  $PBias = -8.70\%$  and  $NSE = 0.68$ ; and for the validation, it was obtained a very good performance by the SWAT model with  $R^2 = 0.85$ ,  $NSE = 0.72$  and  $PBias = -9.20\%$ ; where the simulated flows are similar to the observed flows, showing a greater goodness of fit for the model. Finally, as an alternative agroforestry, the implementation of multi-level live fences with species how aliso (*Alnus jorullensis* H.B.K.), pumamaque (*Oreopanax discolor*) and sauco (*Sambucus nigra* L.) is proposed to contribute to an adequate use of the soil and conservation of the hydric resource. Concluding, that the modeling of the hydric resource in the Mijitayo microwatershed, obtained satisfactory statistical results; however, it is necessary to calibrate and validate, so that the model has greater goodness of fit, and thus more accurately determine the hydrological behavior of the microwatershed

**Keywords:** Calibration, coverage, SWAT, agroforestry, validation.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN.....	10
MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	17
CONCLUSIONES.....	26
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	27

## INTRODUCCIÓN

La modelación hidrológica es de gran importancia porque permite representar numéricamente los procesos hidrológicos que tienen lugar en una cuenca hidrográfica Valenzuela, (2005). Los modelos hidrológicos, son herramientas ideales para el estudio y la evaluación del comportamiento de una cuenca, analizando los cambios en la cantidad y calidad del agua debido a diversos factores, como variaciones en el régimen de precipitación de una región, modificaciones en el uso de suelo y causas de origen antrópico (Brandizi y Labraga, 2012).

En Colombia, la oferta hídrica es abundante con un estimado de 2.011.665 millones metros cúbicos (m<sup>3</sup>); sin embargo, cada día se ve un deterioro en la calidad y cantidad del recurso hídrico ocasionado por actividades antrópicas, especialmente por la minería y la afectación de los páramos (Martínez, 2016). Por ello, la modelación hidrológica constituye una herramienta importante para conocer el comportamiento del caudal en las diferentes cuencas del territorio.

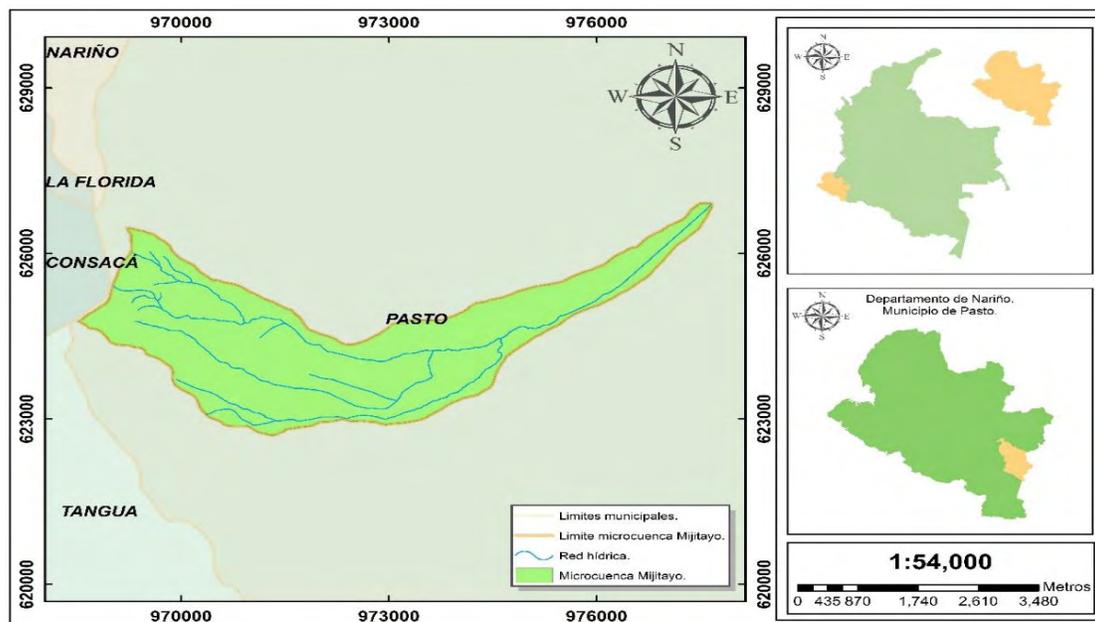
Por su parte, en la microcuenca Mijitayo el recurso hídrico se encuentra sometido a una fuerte presión de demanda de agua para consumo humano, tanto en la zona urbana donde cada año aumenta la demanda en 3,2 % por el crecimiento de la población, como en el área rural (Empresa de Obras Sanitarias de Pasto, 2001). Ante esta problemática, es necesario implementar un modelo hidrológico que permita evaluar el impacto del cambio de cobertura sobre el caudal hídrico (Oñate y Aguilar, 2003).

Por esta razón, existen diversos modelos hidrológicos que permiten analizar diferentes medidas para una adecuada gestión del agua, en una cuenca y a su vez, a contribuir a la toma de decisiones para la planificación del recurso hídrico, mediante la simulación de escenarios climáticos y cambios en el uso del suelo (Notter *et al.*, 2007). Uno de estos modelos hidrológicos es el SWAT (Soil and Water Assessment Tool), el cual se ha venido utilizando en diferentes cuencas alrededor del mundo, donde se han evaluado impactos de los cambios de uso del suelo sobre el recurso hídrico (Prochnow *et al.*, 2008).

Por este motivo, la investigación tiene como objetivo general modelar hidrológicamente la microcuenca Mijitayo, cuyos objetivos específicos son: aplicar el modelo SWAT, para determinar el comportamiento hidrológico, calibrar y validar el modelo y proponer una alternativa de tipo agroforestal que conlleve a un manejo adecuado del uso del suelo y la conservación del recurso hídrico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Localización.** La microcuenca Mijitayo se encuentra localizada al Noroccidente del municipio de Pasto, departamento de Nariño, Colombia, en las estribaciones del Volcán Galeras con coordenadas geográficas  $1^{\circ}13'27,2''\text{LN}$  y  $77^{\circ}17'09''\text{LO}$ . Tiene un área de 1.315,74 ha y hace parte de la subcuenca hidrográfica del río Pasto (Figura 1), posee una temperatura que oscila entre los 3 y  $13^{\circ}\text{C}$ , con una humedad relativa promedio de 67%, una precipitación anual que está entre los 790 y los 2.000 mm y una altura en la parte alta de 4.200 msnm y en su parte más baja de 2.550 msnm (Madróñero, 2006).



**Figura 1.** Mapa de localización, Microcuenca Mijitayo

**Obtención Software.** Para la modelación hidrológica de la zona de estudio se utilizó SWAT (Soil and Water Assessment Tool) con la extensión ArcSWAT 2012.10.19, que trabaja juntamente con la interfaz de ArcGIS 10.3.

**Datos de entrada del modelo.** El modelo hidrológico SWAT, necesita diferentes datos de entrada para que su funcionamiento sea correcto; estos son: modelo de elevación Digital (MDE), delimitación de la microcuenca o máscara, cartografía con la taxonomía de suelo, cartografía de las coberturas de la zona, datos de precipitaciones, temperaturas, humedad relativa, brillo solar y viento del periodo a modelar (Obando y Mora, 2013).

**Modelo Digital de Elevación (MDE).** El MDE de la microcuenca se obtuvo del servidor de la UAF (Alaska Satellite Facility), entidad encargada de obtener imágenes de sensores remotos de la tierra. Los MDE son definidos como una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud en la superficie terrestre, almacenados en una base de datos digital, georreferenciada en un sistema de proyección cartográfica (Felicísimo, 1994).

El MDE obtenido para la microcuenca Mijitayo, posee una resolución de 12 m y una gran variedad altitudinal que van desde los 4.211 hasta los 2.400 msnm (Anexo 1).

**Mapa de coberturas.** Se obtuvo una imagen Landsat ocho con resolución de 30 m e información espectral de ocho bandas a través de la página Earth Explorer del USGS (Servicio geológico de los Estados Unidos), con la cual, y mediante procesos de clasificación en el software ERDAS Imagine, se logró obtener un Raster con la clasificación de las coberturas actuales, las cuales se corroboraron en campo y se ajustaron de manera digital. Los usos del suelo resultantes fueron Siete, correspondientes a: bosque de eucalipto (*Eucalyptus glóbulos* Labill.), maíz (*Zea Mays* L., Sp. Pl.), papa (*Solanum tuberosum* L.), páramo, pastos y Zona urbana (Anexo 2), estas categorías fueron reclasificadas dentro de los tipos de coberturas que SWAT maneja.

**Datos climatológicos e hidrológicos.** Se obtuvo información climatológica de precipitación diaria, temperatura diaria máxima y mínima, humedad relativa diaria, velocidad del viento, brillo solar y caudal, de una estación meteorológica que se encuentra en la zona de influencia que fue la de Obonuco con código [52045010]. Dicha información fue suministrada por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de

Colombia (IDEAM). Además de esta información se obtuvieron datos climatológicos directamente de la database de SWAT.

La información obtenida para ser utilizada en el modelo correspondió a un periodo referencial de 15 años (2000-2014).

**Mapa Taxonomía de suelos.** Esta información fue obtenida del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2004) y corresponde al estudio general de suelos y zonificación de tierras para el Departamento de Nariño (2004) (Tabla 1). Además, se generó en ArcGIS el mapa de suelos, donde se obtuvo siete clasificaciones para la zona de trabajo (Anexo 3).

**Tabla 1.** Clasificaciones del suelo para la zona de estudio.

	<b>Taxonomía de Suelo</b>	<b>Descripción</b>
<b>1</b>	AMBc	Consociación Vitric Haplustands
<b>2</b>	MEAf	Grupo Indiferenciado Typic Melanocryands, Acrudoxic Haplocryands y Misceláneo Rocoso, extremadamente fríos
<b>3</b>	MHAd	Consociación Acrudoxic Melanudands
<b>4</b>	MHAf	Consociación Acrudoxic Melanudands
<b>5</b>	MHCb	Consociación Alic Hapludands
<b>6</b>	MLAe	Consociación Acrudoxic Melanudands
<b>7</b>	ZU	Zona Urbana

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC (2004).

**Parámetros de suelo (Soil data).** Los requerimientos de SWAT se describen en la Tabla 2; sin embargo, algunos tipos de suelos no están disponibles en la base de datos de SWAT, por lo que fue necesario extraer algunos datos adicionales del estudio de suelos del IGAC (2004) y del estudio de efecto del cambio de uso del suelo sobre la cantidad superficial del recurso hídrico en la microcuenca Peñas Blancas, municipio de Tangua, departamento de Nariño (Solarte, 2014).

**Tabla 2.** Parámetros de suelo requeridos por SWAT, Input Data Soil, Input/Output Documentación versión 2012.

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
<b>HYDGRP</b>	Grupo hidrológico del suelo, puede ser A, B, C o D. Se define a un grupo hidrológico como un grupo de suelos que tienen una escorrentía potencial similar bajo condiciones de tormenta y condiciones de cobertura.
<b>SOL_ZMX_</b>	Profundidad máxima de raíz en el perfil del suelo, si la profundidad no es especificada, el modelo asume que la raíz se puede desarrollar en todo el perfil del suelo.
<b>ANION_EXCL</b>	Fracción de porosidad (espacio vacío) de la que se excluyen los aniones. Si el valor no se introduce, el modelo lo tomara como 0,50.
<b>SOL_CRK</b>	Volumen potencial o máximo ruptura, volumen de grieta máxima.
<b>TEXTURE</b>	Textura de la capa del suelo.
<b>SOL_Z</b>	Profundidad de la superficie del suelo a la capa más profunda.
<b>SOL_BD</b>	Densidad en húmedo del suelo, los valores generalmente son entre 1.1 y 1.9 Mg/m <sup>3</sup> .
<b>SOL_AWC</b>	Capacidad de agua disponible en la capa del suelo en mm de Agua sobre mm de suelo, se determina extrayendo la fracción de agua presente hasta el punto de marchitez permanente desde el suelo a capacidad de campo.
<b>SOL_K</b>	Conductividad hidráulica en saturación (mm/hora).
<b>SOL_CBN</b>	Contenido de carbono Orgánico, en % del peso del suelo. Se dice que la se toma el % de peso con la porción de suelo que pasa por el filtro o tamiz de 2 mm.
<b>SOL_CLAY</b>	Contenido de arcillas en % de suelo - partículas menores a 0,002 mm.
<b>SOL_SILT</b>	Contenido de limo en % de suelo - partículas entre 0,05 – 0,002 mm.
<b>SOL_SAND</b>	Contenido de Arena en % de peso del suelo - Partículas de 2 a 0,05 mm.
<b>SOL_ROCK</b>	Contenido de Fragmentos de roca en % de peso del suelo - partículas mayores a 2mm.
<b>SOL_ALB</b>	Albedo del suelo en húmedo, es la radiación solar reflejada por un cuerpo, en el suelo el albedo es reportado cuando está a capacidad de campo.
<b>USLE_K</b>	Ecuación USLE de la probabilidad de suelo (K) ecuación universal de perdida de suelo.
<b>SOL_EC</b>	Conductividad eléctrica.

Fuente: Conceptos básicos y guía rápida para el usuario SWAT (2005)

**Ingreso de datos a SWAT para la modelación de la microcuenca (Input data).** Se ingresó los datos de entrada al modelo SWAT para llevar a cabo el proceso de modelación de la microcuenca de estudio.

**Generación de la red hídrica.** SWAT a partir del modelo digital de elevación (MDE) y procesos algorítmicos de dirección y acumulación de flujo, genera la red hídrica dentro de la cual se elige un punto de desfogue de aguas. Este proceso se basa en la información que posee el modelo digital de elevación, el cual proporciona las cotas de las partes de agua que delimitara la cuenca a partir de un punto de desfogue escogido automática o manualmente.

**Generación de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU's).** Para la generación de las HRU's, se utilizó información espacial de cobertura de suelo, tipo de suelos y pendientes. Teniendo en cuenta el sistema de clasificación de pendientes del Instituto Geográfico Agustín Codazzi se determinaron cinco rangos de pendiente (0-7%, 7-12%, 12-25%, 25-50% y >50%), para los cuales el software creó un mapa de clasificación.

Con el cruce de esta información se generaron las unidades de respuesta hidrológica (HRU), definidas como zonas que, por sus características de coberturas, suelos y pendientes, presentan un comportamiento hidrológico similar.

**Aplicación del modelo.** Con base en los Unidades de Respuesta Hidrológica, los datos climáticos e hidrológicos se corrió el modelo en SWAT, el cual determinó, la cantidad superficial del recurso hídrico, producción de agua por subcuencas, unidades de respuesta hidrológica y caudales.

El modelo corre bajo datos diarios y sus resultados pueden ser, mensuales, anuales y diarios; sin embargo, se optó por reportar los resultados de caudales diarios para periodos promedios mensuales, debido a la facilidad de manipulación de los datos, estos valores se compararon con los datos de caudal observados en la estación de aforo de la quebrada Mijitayo.

**Análisis de Sensibilidad, Calibración y Validación.** Para que la simulación y el modelo tengan una correlación valida respecto al funcionamiento real del sistema, se realizó un análisis de sensibilidad. Para SWAT 2012, se utilizó la herramienta SWAT CUP 5. Este

análisis de sensibilidad identifica los parámetros que tienen mayor influencia en los resultados del modelo con respecto a las observaciones reales.

La calibración del modelo SWAT consiste en realizar un test de los parámetros de salida (caudal, sedimentos, escorrentía, entre otros.) entre los simulados y los observados o tomados en campo, con la finalidad de poder determinar cuáles parámetros de entrada deben ser ajustados en el modelo, y así este pueda asemejarse más a la realidad (Uribe, 2010).

El modelo fue calibrado y validado en base a la comparación de los caudales observados a la salida de la cuenca con los valores predichos por el modelo. Para el periodo de calibración se utilizaron los datos de los años (2007 - 2010), y para el periodo de validación desde el año (2011 - 2014).

**Evaluación del Modelo.** Para evaluar el desempeño del modelo SWAT se utilizó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que mide el porcentaje de la variación de la respuesta que es explicable por la curva ajustada (Mancera, 2003). Además, se calcularon dos estadísticos, basados en medidas dimensionales del error, el coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el cual mide la relación entre la varianza de los residuales y la varianza de los valores observados, su valor óptimo es uno y el sesgo porcentual (PBIAS, Percent Bias), mide la tendencia promedio de que los valores sean mayores o menores que los observados. Un valor positivo indica una sobreestimación y un valor negativo, una subestimación (Moriassi *et al.*, 2007) (Tabla 3).

**Tabla 3.** Esquema de valoración de estadísticos.

<b>Desempeño</b>	<b>NSE</b>	<b>PBIAS</b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>Muy Bueno</b>	0,75 -1	< $\pm 10$	0,8 – 1
<b>Bueno</b>	0,65 -0,75	$\pm 10$ - $\pm 15$	0,6 – 0,7
<b>Satisfactorio</b>	0,50 – 0,65	$\pm 15$ - $\pm 25$	0,5 -0,6
<b>Insatisfactorio</b>	<0,5	> $\pm 25$	> 0,5

Fuente: Moriassi *et al.* (2007)

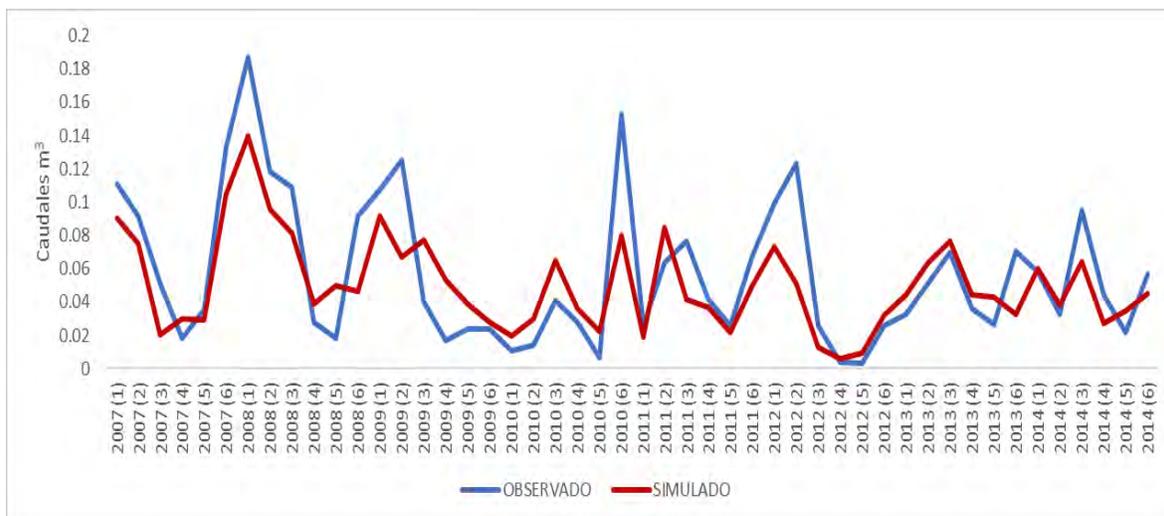
**Modelación del recurso hídrico vs escenarios de cobertura.** Para la modelación del recurso hídrico se utilizaron dos escenarios: el primero corresponde al año 2000 generado por Chávez y Moncayo (2016) y el segundo escenario obtenido en esta investigación del año 2015, donde se comparó el efecto del cambio de cobertura sobre la cantidad del recurso hídrico.

**Proposición de alternativa de manejo y conservación.** La proposición de la alternativa para el manejo del uso de suelo y conservación del recurso hídrico se tuvo en cuenta la obtención de información primaria, la revisión de información secundaria, y los resultados obtenidos en esta investigación. Esta alternativa tiene un enfoque de tipo agroforestal basada en criterios técnicos y sostenibles, con el fin de mejorar la cantidad del recurso hídrico en microcuenca quebrada Mijitayo.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Caudales simulados vs caudales observados.** La aplicación del modelo hidrológico arrojó los siguientes resultados, donde los caudales simulados se ajustan regularmente a los caudales observados; presentando la mayor diferencia en los caudales máximos para algunos periodos de tiempo.

La Figura 2 representa los resultados de caudales cada dos meses por un periodo de ocho años. Durante los meses de enero y febrero del 2008 se observa una subestimación donde el caudal observado es de  $0,187 \text{ m}^3$  y el simulado fue de  $0,14 \text{ m}^3$ , presentando una diferencia de  $0,047$ . En el año 2009 entre los meses de marzo y abril se presenta una diferencia de  $0.058 \text{ m}^3$  y una pequeña sobrestimación de  $0.0045 \text{ m}^3$  en los meses de noviembre y diciembre. En el año 2010 se presentaron diferencias mayores a  $0.07 \text{ m}^3$  de caudal.



**Figura 2.** Caudales simulados vs observados en la microcuenca quebrada Mijitayo.

Con respecto al 2011 es el año donde mayor se ajusta el caudal simulado al caudal observado. Durante los meses de febrero y marzo del año 2012 se presenta una subestimación del  $0,072 \text{ m}^3$ . En los años 2013 y 2014 el caudal simulado presenta pequeñas diferencias, donde más se ajusta el modelo.

Para la evaluación del modelo se utilizó el esquema de valoración propuesto por Moriasi *et al.* (2007), en donde se obtuvo un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,6 (Tabla 6), el cual indica que el modelo fue satisfactorio en el periodo modelado; Por el contrario el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), indicado por Gassman *et al.*, (2007) como el estadístico más utilizado para la calibración y validación de modelos se obtuvo un valor de 0.35, evaluado como insatisfactorio y el sesgo porcentual Percent Bias (PBIAS) adquirió un valor  $-12.30\%$  calificado como bueno, sin embargo estos valores no son favorables según el esquema de valoración de Moriasi *et al.* (2017) por lo que se debe realizar la calibración del modelo para su posterior validación, esta nos permite reducir la incertidumbre en las simulaciones de los modelos hidrológicos (Engel *et al.*, 2007).

**Tabla 6.** Estadísticos generados para la modelación de caudales microcuenca Mijitayo.

Etapa del Modelo	Estadísticos del desempeño del modelo		
	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>NSE</b>	<b>PBias</b>
Modelación Inicial	0,6	0,35	-12,30%
Calibración	0,82	0,68	-8,70%
Validación	0,85	0,72	-9,20%

Del mismo modo Solarte (2014) reportan un caso similar en donde obtuvo valores similares de  $R^2$ , coeficiente de eficiencia (NSE) y sesgo porcentual (PBIAS) de: (0,5, 0,24, -14,6), para su investigación realizada en la microcuenca Peñas Blancas en Tangua, Colombia, donde el modelo subestima la producción de caudales; no obstante después del proceso de calibración y validación se lograron valores de  $R^2$ , coeficiente de eficiencia (NSE) y un sesgo porcentual (PBIAS) de: (0,8, 0,70 y -10,3), logrando un mejor ajuste del modelo. Por consiguiente, se puede afirmar que la calibración y validación de un modelo es necesaria ya que permite ajustar el modelo hidrológico a la realidad.

Por otro lado, las diferencias entre los caudales observados y simulados se deben en primera instancia a que el modelo se desarrolló para actuar en las condiciones de la zona templada, mas no en la zona de trópico, por lo que las condiciones biofísicas, cambian significativamente. Rojas (2009), señala que, en las zonas templadas, no existen formas específicas que conformen un modelado geográfico característico; es decir, no existe un sistema montañoso muy desarrollado como se presenta en la microcuenca Mijitayo que tiene una alta pendiente y agreste topografía; Por otra parte, con respecto a las condiciones climáticas, se presentan cuatro estaciones marcadas a diferencia de la zona tropical, donde se presentan periodos de sequía y de lluvia; específicamente en la zona de la microcuenca que se presentan dos periodos de lluvia durante el año que demuestran el carácter bimodal en su régimen.

De igual manera Quintanilla (2010), afirma que uno de los factores determinantes en la precisión de la modelación con SWAT, es la cercanía y números de estaciones

meteorológicas en la zona de estudio, de igual forma la calidad de datos de estas estaciones. En la microcuenca Mijitayo presenta una estación meteorológica en la parte media, y carece de estaciones en la parte alta y baja, lo cual afecto en el desempeño del modelo.

Además, los suelos de la zona altoandina son de origen volcánico con una alta porosidad y presentan un alto contenido de materia orgánica, para la microcuenca se tuvo un promedio del 20.8% MO, de acuerdo con el estudio general de suelos y zonificación de tierras para el Departamento de Nariño del IGAC (2004), los cuales son responsables de la alta capacidad de almacenamiento de agua, Esta capacidad es mayor cuanto más materia orgánica tengan (Jaramillo, 2002). Por otra parte, Uribe (2013) afirma que los suelos con altos contenidos de materia orgánica no presentan una buena respuesta al momento de modelar caudales ya que SWAT trabaja con la herramienta “Soil Characteristics Tool” la cual funciona mejor para suelos con bajo contenido de materia orgánica (máximo 8%). Por esta razón hay que tener en cuenta las condiciones especiales en los suelos y clima de la zona y estas deben ser introducidas en la base de datos de uso de suelo y tipos de suelo en SWAT.

**Calibración y Validación.** El modelo fue calibrado y validado en base a la comparación de los caudales observados. El periodo de calibración fue desde el 1 de enero 2007 al 31 de diciembre 2010.

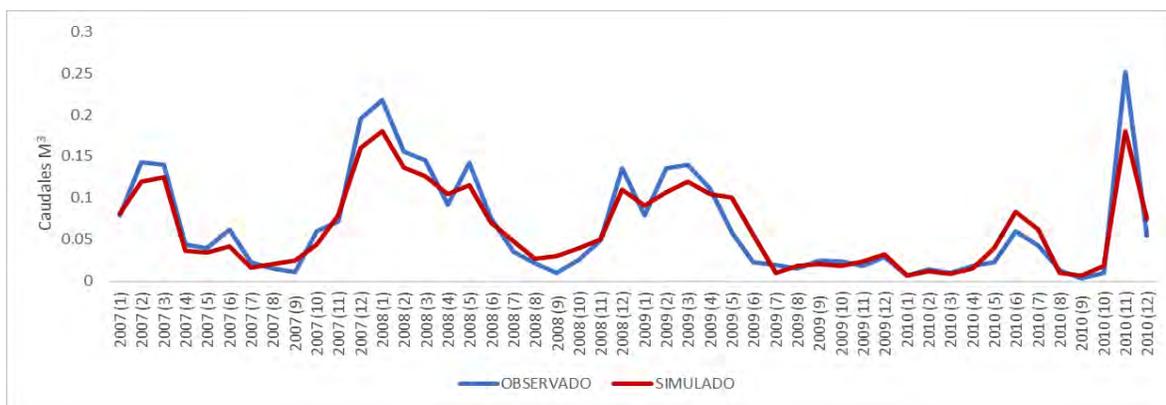
En el proceso de calibración, los parámetros que tuvieron mayor sensibilidad en el análisis obtenido por SWAT CUP fueron: conductividad hidráulica (SOL\_K) y factor de compensación de la evaporación del suelo (ESCO).

Para el ajuste de la conductividad hidráulica (SOL\_K) y factor de compensación de la evaporación del suelo (ESCO), se tuvo en cuenta el estudio realizado por Solarte (2014), donde obtuvieron muestras de campo y fueron analizadas para la obtención del parámetro de conductividad hidráulica de los diferentes tipos de suelo presentes en la microcuenca Peñas Blancas, los cuales presentan similitudes con los suelos de la microcuenca Mijitayo.

Obtenidos los parámetros ajustados se aplicó nuevamente el modelo para el periodo de calibración, indicando un mejor ajuste entre los datos observados y simulados.

La Figura 3 representa el periodo de calibración indicando datos mensuales, observando

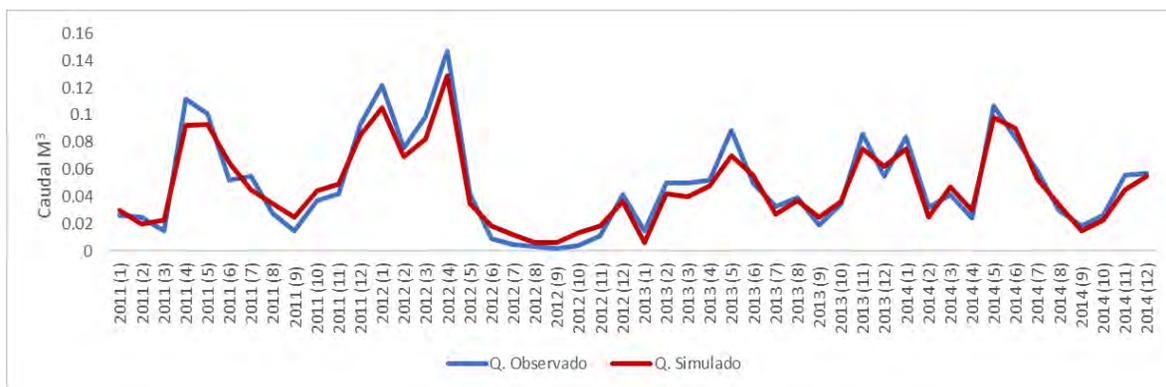
pequeñas subestimaciones, que puede ser a causa de la alta infiltración presente en los páramos y de los bosques altoandinos debido por la presencia de suelos porosos relacionados con altos valores de conductividad hidráulica (Iñiguez, 2003). Igualmente, los suelos del páramo tienen una capacidad de retención de agua muy alta (80-90 %) en saturación (Buytaert, 2004).



**Figura 3.** Caudales Simulados vs Observados, periodo de calibración.

En el periodo de calibración el modelo obtuvo los siguientes valores estadísticos: coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 0,82, eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)= 0,68 y el sesgo porcentual (PBias, Percent Bias) = -8,7; valores que son significativamente mejores (Tabla 6).

En el proceso de validación durante los años 2011 al 2014, los caudales modelados se acercan a los caudales observados, presentando pequeños picos de subestimación, donde se afirma que el modelo se ajustó correctamente (Figura 4).



**Figura 4.** Caudales Simulados vs Observados, periodo de validación.

Con la validación del modelo, los valores estadísticos fueron favorables, indicando que un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 0,85, eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)= 0,72 y el sesgo porcentual (PBias, Percent Bias) = -9,7; los cuales son valores significativamente mejores (Tabla 6).

Un caso similar reporta Castañeda (2016) en su estudio en la cuenca del río Coello en Tolima, Colombia, donde se obtuvo valores similares después del proceso de calibración y validación de  $R^2$  y coeficiente de eficiencia (NSE) de (0,96 y 0,76), donde determinaron que el modelo SWAT, es una herramienta adecuada para la simulación del caudal en cualquier punto de la cuenca, igualmente Lelis *et al.* (2012), en su investigación en la cuenca hidrográfica del río San Bartolomé, Viçosa, Brasil, determinaron que los parámetros más sensibles del modelo están relacionados con las propiedades físicas del suelo, como la capacidad de agua disponible, la conductividad hidráulica y el número de la curva, haciendo necesaria la calibración manual del modelo para reducir la incertidumbre; Por lo tanto, se deduce que el modelo SWAT no fue desarrollado para esta zona, pero este se ajustó a las condiciones del territorio, donde se adaptaron algunos parámetros y este respondió de manera satisfactoria, corroborando lo dicho por Solarte (2014) donde afirma que los modelos hidrológicos pueden ser utilizado para modelaciones en la zona altoandina.

**Efecto del cambio de cobertura en el comportamiento del caudal durante el periodo 2000 al 2015.** De acuerdo con la información de coberturas generada por Chávez & Moncayo (2016), para el año 2000, se encontraron cambios de cobertura y uso del suelo respecto al año 2015 (Tabla 7). La cobertura de páramo para el año 2000 era de 261.37 has, lo cual disminuyó en un 7,82% del área total para el 2015. La cobertura boscosa en el año 2000 cubría un área de 455,18 has, donde aumentó 12,92% en el año 2015. Los cultivos de la microcuenca han presentado un incremento del 9,47%. Los Pastos en la microcuenca han disminuido en un 14.97%. finalmente, la zona urbana ha presentado un pequeño crecimiento del 0.41%.

**Tabla 7.** Cambios de cobertura microcuenca Mijitayo, año 2000 y 2015

<b>Cobertura</b>	<b>Año 2000 (Has)</b>	<b>% Del Área</b>	<b>SW_END mm</b>	<b>Año 2015 (Has)</b>	<b>% Del Área</b>	<b>SW_END mm</b>
<i>Páramo</i>	261,37	19,85	175,3	158,38	12,03	151,82
<i>Bosque</i>	455,11	34,56	138,12	625,18	47,47	140,56
<i>Cultivos</i>	204,26	15,51	85,15	328,89	24,98	73,72
<i>Pastos</i>	277,38	21,06	102,38	80,22	6,09	97,08
<i>ZU</i>	118,75	9,02	10	124,2	9,43	10
<b>Total</b>	1316,87	100	500,95	1316,87	100	463,18

SW\_END: Contenido de agua del suelo (mm H<sub>2</sub>O). Cantidad de agua en el perfil del suelo al final del período de tiempo (producción de agua).

De acuerdo con el presente estudio, se obtuvo un promedio de caudal diario de 0,059 m<sup>3</sup> para el año 2000, donde se observa un ligero aumento del 7% con respecto al caudal del año 2015 que fue de 0,055 m<sup>3</sup>, debido principalmente al aumento de la cobertura de páramo, y a la disminución de cultivos. Se debe tener en cuenta que en el año 2015 se presentó un incremento del bosque lo cual generó una pequeña diferencia de caudal entre el año 2000 y 2015, debido a que el bosque alto andino presenta una alta capacidad de almacenamiento de agua donde alcanza valores de hasta el 80% del volumen de agua en capacidad de campo (Tobón *et al.*, 2009).

**Alternativa agroforestal para la conservación del suelo y recurso hídrico.** De acuerdo con las coberturas del año 2015 de la microcuenca Mijitayo, presenta una actividad agropecuaria en la zona de amortiguamiento basada principalmente en los cultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.), maíz (*Zea Mays* L., Sp. Pl.), hortalizas; y pastos como kikuyo (*Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov., Anuario Reale Ist. Bot. Roma.), saboya (*Panicum máximum* cv. Tanzania.) y raygrass (*Lolium perenne* L.), además, se observa una disminución del páramo en un 60.59% causada principalmente por el cambio climático y actividades antrópicas (Chávez y Moncayo, 2016); lo que ha generado un impacto negativo sobre las condiciones del suelo dificultando el almacenamiento y regulación del recurso hídrico como lo afirma Martínez (2014). Una forma de mitigar los impactos negativos es la

implementación de sistemas agroforestales, ayudando a la conservación del suelo y del recurso hídrico (cantidad y calidad), al favorecer la infiltración y reducir la escorrentía superficial (Beer *et al.*, 2003).

Teniendo en cuenta los resultados de este estudio y el contexto de la zona, se recomienda el establecimiento de cercas vivas, debido a que la microcuenca se caracteriza por poseer minifundios con áreas que van desde 0,1 a 3 hectáreas, razón por la cual los agricultores no prefieren incluir arboles dentro de sus fincas, debido a que llegan a ocupar espacios que pueden ser utilizados para la siembra de cultivos. De la misma manera Cortez y Quiñonez (2013), manifiestan que las cercas vivas tienen una mayor aceptabilidad, debido a que estas ocupan un menor espacio en las áreas productivas; y su implementación y manejo es de bajo costo.

Por otra parte, este tipo de sistema agroforestal representa una alternativa viable tanto ambiental, económica y socialmente porque puede brindar beneficios como forraje, protección del suelo, reguladores de agua, entre otros. Esto es corroborado por Vela y Jiménez (2009), quienes afirman que la implementación de cercas vivas, presentan un potencial para la conservación del recurso hídrico; además, generan beneficios socio económicos como la leña, postes, frutos, forraje y beneficios ambientales como conservación del suelo, belleza escénica, fijación de carbono y hábitat para la biodiversidad.

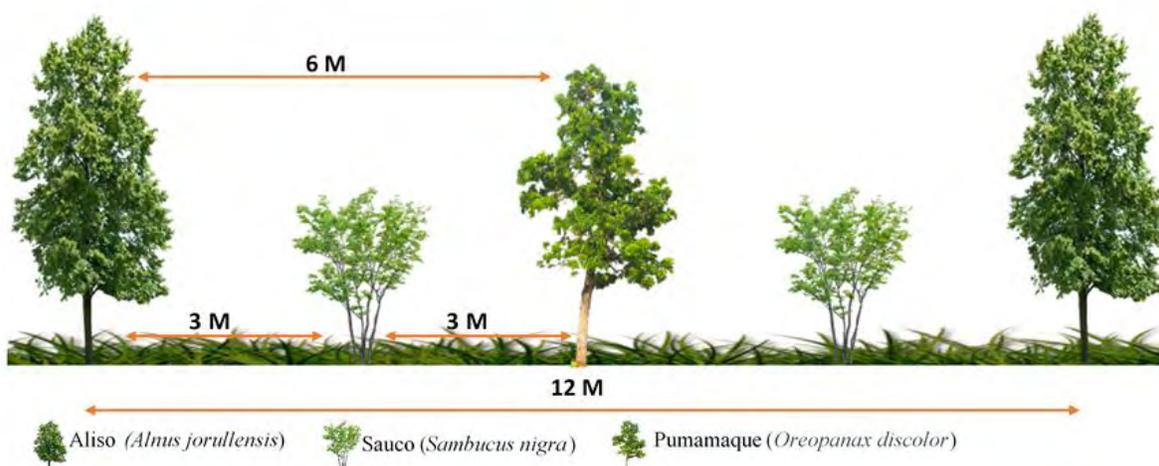
Con base en lo anterior, se propone establecer cercas vivas multiestrato, con especies como: aliso (*Alnus jorullensis* H.B.K.), sauco (*Sambucus nigra* L.) y pumamaque (*Oreopanax discolor* (Kunth) Decne. & Planch.)

El aliso (*Alnus jorullensis* H.B.K.) es una especie predominante en la zona andina, que genera alternativas de bienes y servicios ambientales especialmente en la conservación del suelo y del recurso hídrico, donde se la encuentra en las riberas de ríos, quebradas, y en sistemas agroforestales como cercas vivas o arboles dispersos (Acosta y Tupaz, 2007). E igualmente en la microcuenca Jiménez y Andrade (2015), evidenciaron la presencia del

aliso (*Alnus jorullensis* H.B.K.) en cercas vivas, donde los agricultores de la zona la prefieren porque esta especie no le reseca el suelo y no causa daño a los cultivos.

Con respecto al sauco (*Sambucus nigra* L.), es una especie de crecimiento rápido, la cual es usada por el aporte de forraje y materia orgánica, regulación del sombrío, fijación de nitrógeno, protección del suelo y de fuentes hídricas (Grajales *et al.*, 2015). De acuerdo con lo anterior se convierte en una alternativa para sistemas agrosilvopastoriles principalmente en arreglos de cercas vivas, cortinas rompe vientos y bancos forrajeros (Cárdenas *et al.*, 2011).

Por último, la especie a implementar es el pumamaque (*Oreopanax discolor* (Kunth) Decne. & Planch.), nativa de la zona andina y presenta un crecimiento rápido, la cual es utilizada por los agricultores porque protege las riberas de los ríos, produce buena hojarasca, brinda buen sombrío, e inductor de procesos de restauración de los bosques maduros (Mahecha *et al.*, 2012).



**Figura 9.** Esquema de la alternativa agroforestal (cercas vivas multiestrato).

La Figura 9 representa el diseño recomendado para el establecimiento de las cercas vivas multiestrato a una hilera, donde las especies de aliso (*Alnus jorullensis* H.B.K.) y pumamaque (*Oreopanax discolor* (Kunth) Decne. & Planch.) se encuentran a una distancia de seis metros debido que estas especies son maderables y presentan una altura promedio de 20 metros, y en medio de estas dos especies se establece el sauco (*Sambucus nigra* L.) a tres metros de distancia el cual es un arbusto, con una altura de tres a cuatro metros. Este

tipo de arreglo agroforestal representa una alternativa viable tanto ambiental, social y económicamente, debido a que conlleva a la conservación del suelo, protección del recurso hídrico y presenta beneficios adicionales que pueden beneficiar a las familias campesinas de la zona, logrando una probabilidad de adopción entre los pobladores.

## **CONCLUSIONES**

La modelación del recurso hídrico en la microcuenca Mijitayo, arrojó resultados estadísticos satisfactorios con un R<sup>2</sup> del 0,6; sin embargo, es necesario la calibración y validación, para que el modelo tenga mayor bondad de ajuste y así determinar con mayor exactitud el comportamiento hidrológico de la microcuenca.

La calibración y validación del modelo en la microcuenca Mijitayo, arrojó resultados estadísticos muy buenos con un R<sup>2</sup> del 0,82 y 0,85, donde los datos observados fueron similares a los datos simulados, concluyendo que el modelo puede ser utilizado para estimar el comportamiento hidrológico.

El comportamiento hidrológico para el año 2015, fue menor en comparación al año 2000, debido a la disminución en las áreas de páramo, resultado de los procesos de ampliación de la frontera agrícola que afectó la disminución del caudal en la zona.

La implementación de cercas vivas multiestrato, representa una alternativa agroforestal viable porque permitirá a futuro mejorar el comportamiento hidrológico de la microcuenca, brindando beneficios ambientales, sociales y económicas, que contribuyen a la conservación de los recursos naturales y mejoran la calidad de vida; sin embargo, es importante la transferencia de tecnología, para manejar adecuadamente los usos del suelo y fomentar la conservación del recurso hídrico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta, J. & Tupaz, F. (2007). Cuantificación de la captura de carbono por la biomasa aérea de aliso (*alnus jorullensis* H.B.K.) en dos arreglos agroforestales de la granja experimental botana universidad de Nariño. Municipio de Pasto. Departamento de Nariño. Tesis de grado Ingeniero Agroforestal. Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño. Pasto, Colombia. 78 p.

Beer, J.; Harvey, Celia; Ibrahim, M.; Harmand, J. M.; Somarriba, E. & Jiménez, F. (2003). “Servicios ambientales de los sistemas agroforestales”, *Agroforestería en las Américas*, 10 (37-38): 80 p.

Brandizi, L., & Labraga, J. C. (2012). Calibración del Modelo Hidrológico SWAT en la Cuenca del Río Salado, Provincia de Buenos Aires. p 8-10. En: XI Congreso de Meteorología, CONGREMET XI, Mendoza, Argentina.

Buytaert, W. (2004). The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology. Ph.D. thesis, Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, Katholieke Universiteit Leuven. 105 p.

Castañeda, Y. (2016). Modelación del efecto del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Coello, bajo escenario de cambio climático, a través de la aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil And Water Assessment Tool). Trabajo de grado de Ingeniera forestal. Facultad del medio ambiente y recursos naturales. Universidad distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. 103 p.

Chávez, D. & Moncayo, V. (2016). Análisis Multitemporal De La Cobertura En La Microcuenca Mijitayo Municipio De Pasto, Departamento De Nariño. Tesis de grado Ingeniero Agroforestal, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño. Pasto, Colombia. 14 p.

Cortez, C & Quiñonez, F. (2013). Priorización de alternativas agroforestales en el ecosistema de páramo de paja blanca. Tesis de grado ingeniero Agroforestal, facultad de ciencias agrícolas, universidad de Nariño, Pasto, Colombia. 23 p.

Empopasto -Empresa de Obras Sanitarias de Pasto. (2001), Plan de Gestión Ambiental 2001-2006, Disponible en: [http://www.empopasto.com.co/bid/admin/upload\\_files/08\\_PMA\\_CALLE\\_18.pdf](http://www.empopasto.com.co/bid/admin/upload_files/08_PMA_CALLE_18.pdf) .23 P. 185 P.

Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J. & Arabi, M. (2007), A Hydrology / Water Quality Model Applicati1. *Revista JAWRA de la Asociación Americana de Recursos Hídricos*, 43(5): 1223-1236. doi: 10.1111 / j.1752-1688.2007.00105.x.

Felicísimo, A. (1994). Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales, Primera Edición, Nobel SA, Principado de Asturias. 118 p.

Gassman, P. W.; Reyes, M. R.; Green, C. H. & J. G. Arnold. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. Disponible en: [https://www.card.iastate.edu/research/resource-and-environmental/items/abe\\_swat.pdf](https://www.card.iastate.edu/research/resource-and-environmental/items/abe_swat.pdf). 28 p.; Consulta: Febrero, 2018.

Grajales, B., Botero, M & Ramírez, J. (2015). Características, manejo, usos y beneficios del saúco (*Sambucus nigra L.*) con énfasis en su implementación en sistemas silvopastoriles del Trópico Alto. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. 6 (1): 155 – 168.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Sistema de Información nacional ambiental. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>: consulta: Marzo 2017

IGAC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2004). Estudio General de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Nariño. Bogotá. Colombia: IGAC. 558p.

Iñiguez, V. (2003). Balance hídrico de microcuencas de páramo. Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Cuenca, Ecuador. 16 p.

Jaramillo, O. (2002). Protocolo para el Desarrollo de actividades de revegetalización con fines de restauración en la Reserva Forestal de Pantano Redondo y Nacimiento del Río Susaguá. Disponible en: [https://issuu.com/leoh.h/docs/los\\_bosques\\_andinos\\_y\\_el\\_agua](https://issuu.com/leoh.h/docs/los_bosques_andinos_y_el_agua). 64 p. Consulta: noviembre 2017.

Jiménez, L. & Andrade, S. (2015). Caracterización de las cercas vivas y la avifauna asociada en la vereda San Felipe, Microcuenca Mijitayo, Municipio De Pasto, Departamento De Nariño. Tesis de grado Ingeniero Agroforestal, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño. Pasto, Colombia. 37p.

Lelis, T., & Calijuri, M., y da Fonseca Santiago, A., y Cardoso de Lima, D., y de Oliveira Rocha, E. (2012). Análise de sensibilisade e calibração do modelo SWAT aplicado en bacía hidrográfica de la región sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36 (2): 623-634. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000200031>.

Madroñero, S. & Jiménez, F. (2006). Manejo del recurso hídrico y estrategias de gestión integral en la microcuenca del río Mijitayo (Tesis de pregrado). Universidad de Nariño, Pasto, Colombia. 183p.

Mahecha, G., Ovalle, A., Camelo, D., Roza, A. & Barrero, D. (2012). Vegetación del Territorio de la CAR, 450 especies de sus llanuras y montañas. Segunda edición. Bogotá, Colombia.

Cárdenas, C, Rocha, C & Mora J. (2011). Productividad y preferencia de forraje de vacas lecheras pastoreando un sistema silvopastoril intensivo de la zona alto Andina de Roncesvalles, Tolima. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*. 4 (1): 29-35 p.

Mancera, E; Peña, E.; Giraldo, R & Santos, A. (2003). Introducción a la modelación ecológica: Principios y aplicaciones.. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 109 p.

Martínez, D. (2016). Aguas entre la privatización y las alternativas. Disponible en: <http://censat.org/es/publicaciones>. 68 p. consulta: Enero, 2018.

Martínez, L. (2014). El recurso hídrico en el cultivo de papa: implicaciones socioculturales y ambientales. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. *Revista Trabajo Social*. 16 (1): 205-219.

Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations *Transactions of the ABASE*, 50 (3): 885-900.

Notter, B; Macmillan, L; Viviroli, D; Weingartner, R; Liniger, Hp. (2007). Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region. *Journal of Hydrology. Amsterdam*, 343 (4):266-278. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.022>.

Obando, J & Moran, J. (2013). Modelación del recurso hídrico en la microcuenca peñas blancas, municipio de Tangua, departamento de Nariño. Trabajo de grado ingeniero Agroforestal, Facultad de ciencias agrícolas, Universidad de Nariño. Pasto, Colombia. 28p.

Oñate, F & Aguilar, N. (2003). Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del río Catamayo. 11 p. Tercer Congreso Latinoamericano del manejo de cuencas hidrográficas, Arequipa, Perú.

Prochnow, S.J., White, J.D., Scott, T., Filstrup, C.D., (2008). Multi-scenario simulation analysis in prioritizing management options for an impacted watershed system. *Ecology Hydrobiology*. 8 (1): 3-15. doi: <https://doi.org/10.2478/v10104-009-0001-4>.

Quintanilla, M. (2010). Disponibilidad y demanda de agua en la cuenca Pirafé: situación actual y escenario de cambio climático. Disponible en: [http://www.fan-bo.org/wp-content/files/Oferta\\_y\\_Demanda\\_de\\_agua\\_p.pdf](http://www.fan-bo.org/wp-content/files/Oferta_y_Demanda_de_agua_p.pdf). 23 p; consulta: Febrero 2018.

Rojas, R. (2009). Hidrología aplicada al manejo de cuencas. Universidad de los Andes. Facultad de ciencias forestales y ambientales. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingeniería/rojas/manualhid.pdf>. 23 p.; consulta: Febrero, 2018.

Solarte, J. (2014). Efecto del cambio de uso del suelo sobre la cantidad superficial del recurso hídrico en la microcuenca peñas blancas, municipio de Tangua, departamento de Nariño. Trabajo de grado de Magister en Ingeniera Ambiental. Facultad de posgrados y relaciones internacionales. Universidad Mariana. Pasto, Colombia. 63 p.

Tobón, C., Bruijnzeel, L.A., Frumau, A. (2009). Physical and hydraulic properties of Tropical Montane Cloud Forest soils and their changes after conversion to pasture. 50 p. Proceedings of the Second International Symposium: Science for Conserving and Managing Tropical Montane Cloud Forests, Waimea, Hawaii.

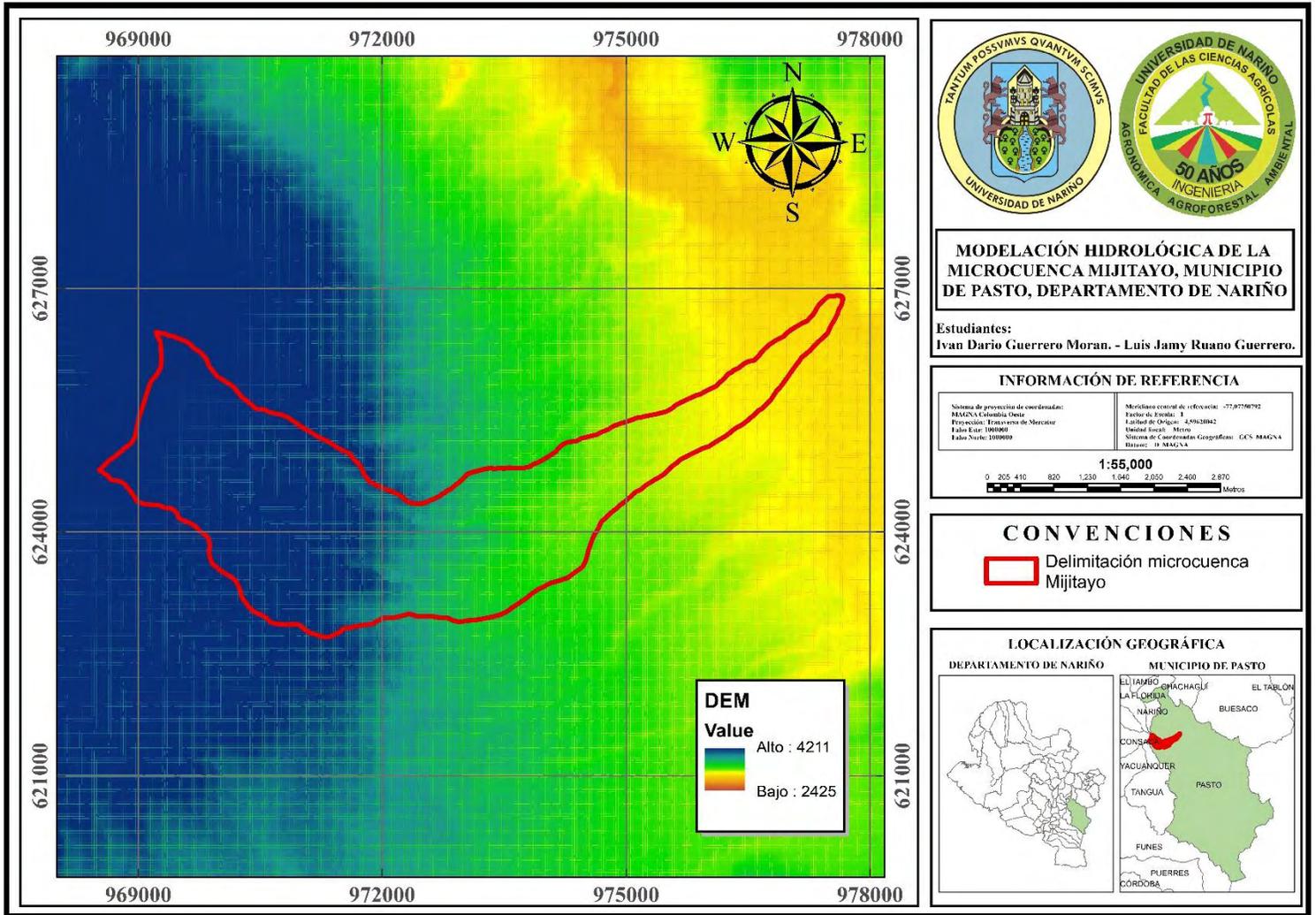
Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Soil and Water Assessment. Disponible en: <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>. 10 p. 46 p. Consulta: Enero 2018.

Uribe, N. (2013). Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a la Cuenca del Río Cañete (SWAT). Disponible en: [ftp://ftp.ciat.cgiar.org/DAPA/users/jvalencia/Modelo\\_SWAT\\_Ca%C3%B1ete/Segundo%20Informe\\_SWAT%202013.pdf](ftp://ftp.ciat.cgiar.org/DAPA/users/jvalencia/Modelo_SWAT_Ca%C3%B1ete/Segundo%20Informe_SWAT%202013.pdf). 28 p. 48 p. Consulta: Diciembre, 2017.

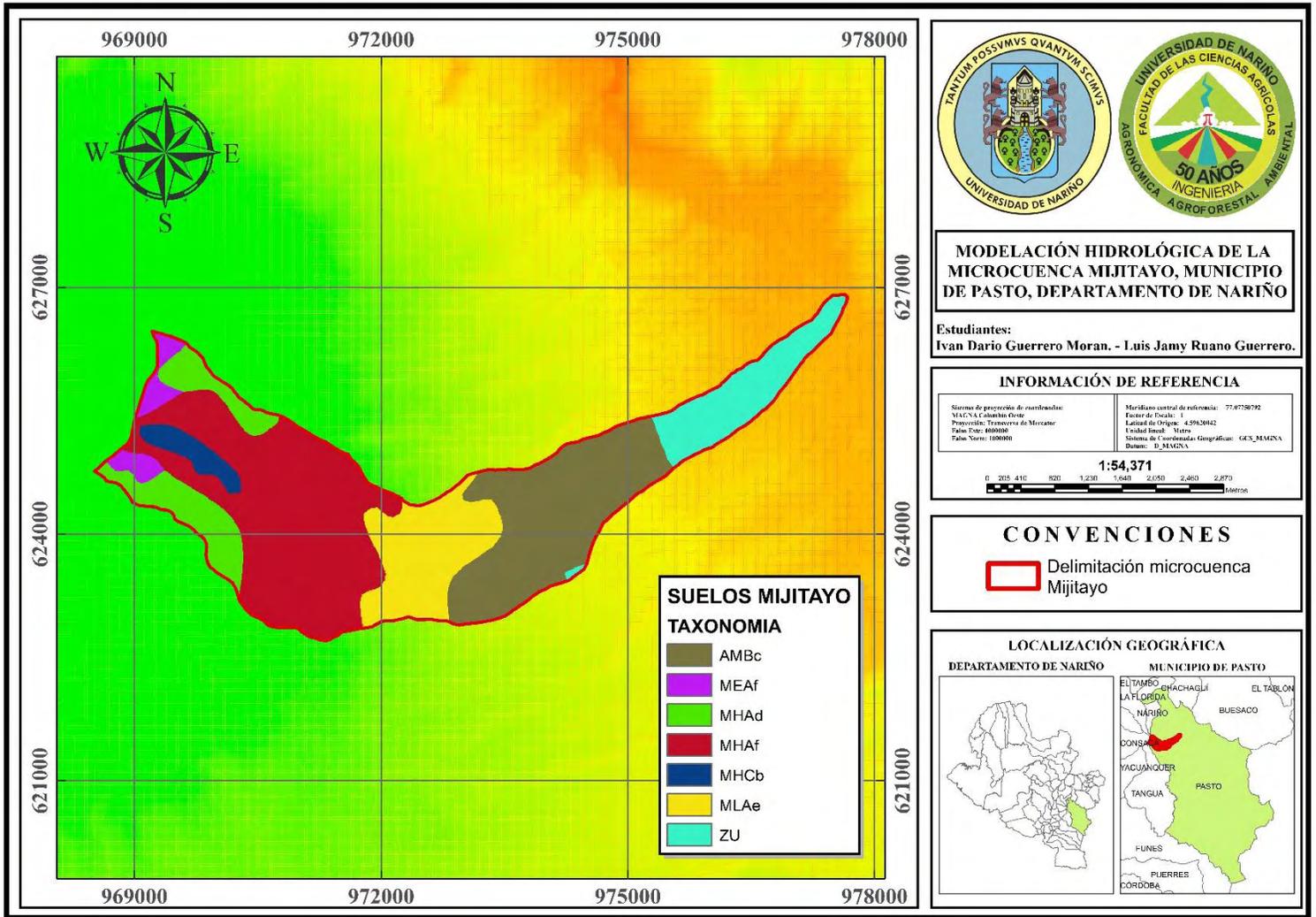
Vela, M. & Jiménez, F. (2009). Sistemas agroforestales en áreas de recarga de agua para consumo humano en la cuenca alta del río Bobo, Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente (CATIE)*. 59 (1): 68 – 75.

Valenzuela, P. (2005). Aplicación del Modelo Hídrico SWAT 99.2 para el análisis del impacto de la deforestación y del avance de la frontera agrícola en la producción y almacenamiento del recurso agua en las partes alta y media de la Subcuenca del Río San Pedro. Trabajo de grado de Ingeniera geógrafa, Facultad de ingeniería geográfica y del medio ambiente. Escuela politécnica del ejército. Sangolquí, Ecuador. 23 p.

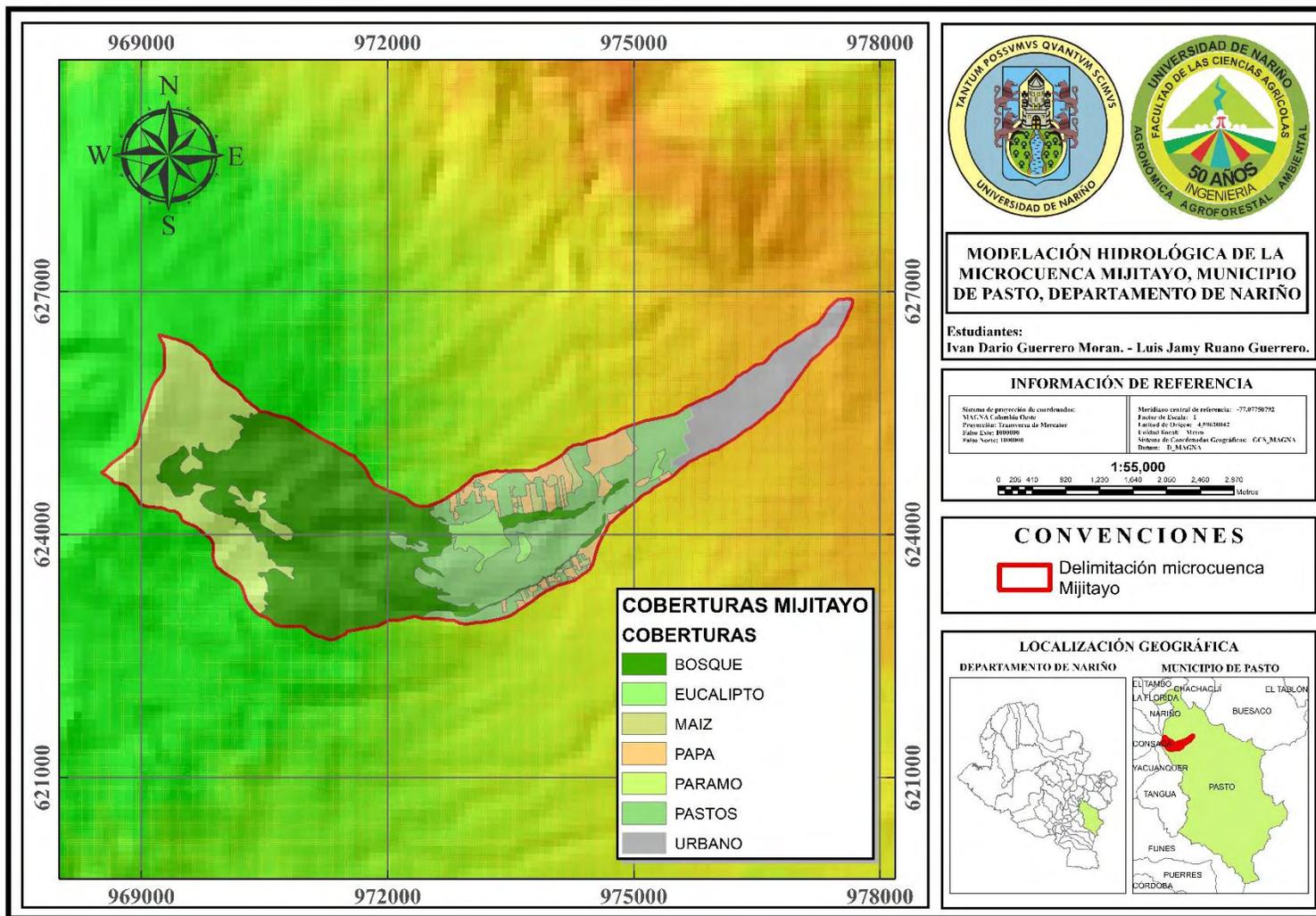
# **ANEXOS**



Anexo 1. Modelo digital de elevación, Microcuenca Mijitayo.



Anexo 2. Mapa de taxonomía de suelos, Microcuenca Mijitayo



Anexo 3. Mapa de coberturas, Microcuenca Mijitayo