


Proyección de escenarios de disponibilidad hídrica con énfasis en coberturas y uso del suelo, usando el software WEAP 2021.0.1.5 aplicado a la subcuenca del río Malacatoya (República de Nicaragua), para el periodo 2000-2018 y 2020-2030*


Projection of water availability scenarios with emphasis on land cover and land use, using WEAP software version 2021.0.1.5, applied to the Malacatoya River sub-basin (Republic of Nicaragua), for the periods 2000–2018 and 2020–2030

Jonathan Herrera¹

¹ Nicaraguan Aquatic Resources Research Center at the National Autonomous University of Nicaragua (CIRA-UNAN). Responsable del laboratorio de Aguas Naturales del Centro de Investigación de Recursos Acuáticos UNAN-Managua/CIRA, con especialidad en Hidrología y maestría en análisis químico y bioquímico.
Correo: josem.diaz@unad.edu.co.  0000-0001-8568-2407.

Como citar:

Herrera, J. (2026). Proyección de escenarios de disponibilidad hídrica con énfasis en coberturas y uso del suelo, usando el software WEAP 2021.0.1.5 aplicado a la subcuenca del río Malacatoya (República de Nicaragua), para el periodo 2000-2018 y 2020-2030. *CITAS*, 12(1), 34-58.

 <https://doi.org/10.10.15332/24224529.11328>

Recibido: 15/09/2025
Aceptado: 02/12/2025



Resumen

En este artículo se analizó la disponibilidad de recurso hídrico para la subcuenca del río Malacatoya, localizada al norte del lago Cocibolca. Para evaluar la disponibilidad mediante el modelo WEAP, se utilizaron los parámetros morfométricos de la cuenca, dentro de los cuales está el análisis cobertura y uso de la tierra.

*Artículo de investigación. Esta investigación es origen de la tesis monográfica para optar al título de especialista en Hidrología, investigación realizada en el Centro de Investigación de Recursos Acuáticos UNAN-Managua/ CIRA en colaboración con la FAO.

Además, se realizó una subdivisión del área de estudio, para las que se calibraron los parámetros de un modelo de carácter semidistribuido con características conceptuales y de base física en WEAP, presentando el análisis de las categorías de uso propuesto; estos se definieron de acuerdo con el uso potencial del suelo de la República de Nicaragua para el año 2021 (con ajustes para su representación a escala de la cuenca nivel 6 según Pfafstetter), y se consideró el tipo de suelo, su textura y la clase de capacidad de uso. Los modelos se calibraron a escala mensual. Finalmente, se evaluó el desempeño de la simulación correspondiente al periodo propuesto en el rango de 2020 al 2030, por medio del índice de Nash, el cual resultó ser satisfactorio, con un valor cuantificado de 0.79 y un coeficiente de correlación de los datos observados contra los datos simulados de $R^2 = 0.90$. Por otro lado, se pudo evidenciar que los dos escenarios simulados presentaron cambios en el volumen de agua escurrida en relación con el caudal base del modelo. Para el caso del escenario 1, los caudales suman un total de 378.68 m³/anual, incrementando el volumen disponible de agua anual de la cuenca en un 56.65 %. Mientras que, para el escenario 2, se obtuvo una disminución de disponibilidad de agua anual para un 18.75 % de los caudales resultantes del modelamiento, resultado de la degradación de los suelos de la cuenca y de las extensas áreas de cultivo y pasto, que producen una mayor evapotranspiración y reducen la disponibilidad de agua en la cuenca.

Palabras clave:

gestión del agua, modelación hidrológica, disponibilidad hídrica, cuenca, evaluación.

Abstract

In this article, the availability of water resources for the Malacatoya River sub-basin, located north of Lake Cocibolca, was analyzed. To assess water availability using the WEAP model, the morphometric parameters of the basin were used, including an analysis of land cover and land use. In addition, the study area was subdivided, and the parameters of a semi-distributed model with conceptual and physically based characteristics were calibrated in WEAP. The analysis of the proposed land-use categories is presented; these were defined according to the potential land use of the Republic of Nicaragua for the year 2021 (with adjustments for their representation at basin scale level 6 according to Pfafstetter), considering soil type, texture, and land-use capability class. The models were calibrated at a monthly time scale. Finally, the performance of the simulation corresponding to the proposed period from 2020 to 2030 was evaluated using the Nash index, which proved satisfactory, with a quantified value of 0.79 and a correlation coefficient between observed and simulated data of $R^2 = 0.90$.

On the other hand, it was observed that the two simulated scenarios showed changes in runoff volume in relation to the base flow of the model. In the case of Scenario 1, the flows totaled 378.68 m³/year, increasing the annual available water volume of the basin by 56.65%. Meanwhile, for Scenario 2, a decrease in annual water availability of 18.75% was obtained from the flows resulting from the modeling, as a consequence of soil degradation in the basin and the extensive areas of crops and pasture, which produce higher evapotranspiration and reduce water availability in the basin.

Palabras clave:

water management, hydrological modeling, water availability, basin, assessment.

Introducción

La implementación de modelos de simulación en la gestión del agua puede ayudar a explorar los impactos que tendrían una serie de supuestos alternativos sobre las políticas futuras, costos y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación (Salinas Villafañe & Paz Rada, 2011). Los mismos autores indican que el uso de modelos puede influir en los cambios provocados por variaciones de la demanda y el suministro, impactos en el cambio de políticas futuras y clima, compatibilidad con objetivos ambientales y costos, en función al analizar “el mejor uso posible del recurso agua y su correcta

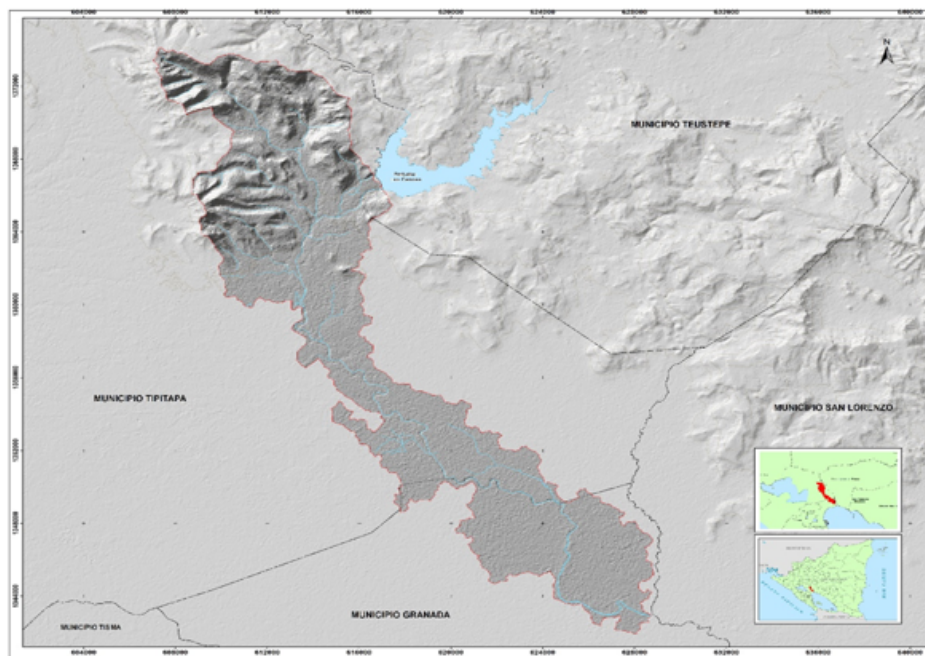
administración” en la permanente búsqueda de un desarrollo sostenible de la región. A continuación, se presenta, primero, la descripción de la modelación hidrológica destinada a la gestión del recurso hídrico y una descripción detallada sobre el modelo WEAP 2021.0.1.5; después, se expone la metodología implementada para realizar la representación de la subcuenca del río Malacatoya en el modelo WEAP y mostrar los resultados correspondientes de la modelación, detallando las diferentes fuentes de información empleadas para crear el modelo topológico de esta cuenca. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones del artículo.

Área de estudio

El río Malacatoya se localiza al norte del lago Cocibolca, entre las coordenadas geográficas 12°25'41'' N, 86°00'46'' O y 12°08'11'' N, 85°49'26'' O. Este presenta elevaciones entre los 29 y los 152 m s. n. m., tiene una superficie de 176.56 km² y es compartida por los municipios de Tipitapa (132.23 km²), Granada (42.86 km²) y Teustepe (1.46 km²), como se puede ver en la figura 1.

Figure 1

Mapa de ubicación de la unidad hidrológica del río Malacatoya



Fuente: elaboración propia.

Materiales y métodos

Tipo de Investigación

Esta investigación fue de tipo descriptivo, ya que buscó determinar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Malacatoya. El alcance del estudio fue de tipo prospectivo, pues se realizaron escenarios a futuro, de acuerdo con el cambio de uso del suelo; a su vez, la investigación fue longitudinal, debido a que para la determinación de la disponibilidad hídrica se utilizaron datos generados en diferentes periodos de

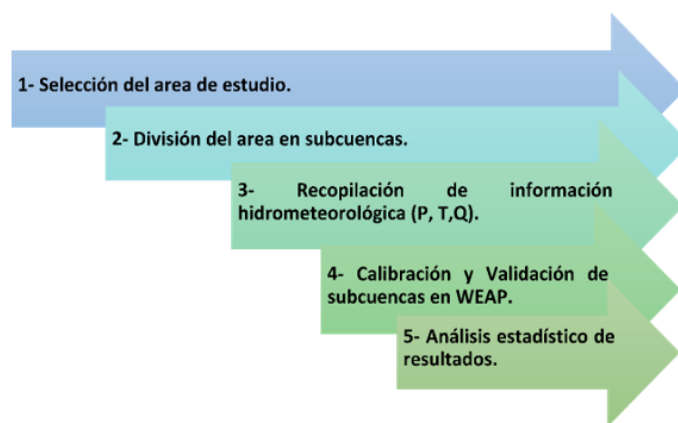
tiempo. La investigación se desarrolló dentro de la clasificación correlacional, puesto que existió un vínculo entre las variables de suelos para diferentes escenarios y la disponibilidad del agua en el área de estudio, con el fin de evaluar la relación de variables y dar respuestas a las hipótesis planteadas para la investigación.

Unidad de análisis

Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de información

Figure 2

Metodología de trabajo



Fuente: elaboración propia.

El proceso de modelación y calibración se llevó a cabo siguiendo el esquema presentado en la figura 2, donde el proceso cuatro se realizó a partir de la iteración del modelo desarrollado en WEAP. Cada una de las iteraciones en cuestión fue almacenada y analizada con el fin de verificar el comportamiento y avance del proceso de calibración, hasta que se obtuvieron los mejores valores de eficiencia posibles.

Procesamiento de información

Recolección de datos

La recopilación de datos se realizó en dos etapas. La primera tuvo como objeto dar soporte a la aplicación inicial del modelo en WEAP; en esta etapa se compiló la información existente en ministerios e instituciones de gobierno (Ineter, ANA, etc.), bases de datos internacionales, información de satélite e información publicada en estudios previos y en una segunda etapa la cual estuvo orientada a la validación, ajuste y calibración del modelo, para lo cual se realizó el procesamiento, depuración y análisis de las series temporales de variables hidrometeorológicas, tales como precipitación, temperatura y caudales observados. Asimismo, se integró información actualizada de cobertura y uso del suelo y parámetros hidrológicos, con el fin de ajustar los supuestos del modelo y mejorar la representación de los procesos hidrológicos de la subcuenca.

Análisis de la información

El modelo recibió información meteorológica, hidrológica y de suelos para la estimación de los componentes que forman parte del análisis del programa. Inicialmente se definen los *catchments*, es decir, la unidad de análisis donde se identificó la red hídrica principal, los suministros, las demandas y retornos. A continuación,

se muestra el procesamiento de cada uno de ellos:

Red hídrica

Se obtuvieron datos de caudales mensuales y diarios de las estaciones Las Banderas, La Unión y Santa Juana, para el periodo de 1952-1988. Es importante señalar que la base de datos no estaba completa, ya que en algunos meses no se realizaron mediciones.

Infraestructura física de control y aprovechamiento de recursos hídricos

Se identificaron los elementos de infraestructura física dentro de la cuenca utilizando como base las hojas topográficas 2952 I, 2953 II, 3052 III, 3053 III y 3053 IV ([Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales \(INETER\), 1989](#)), así como imágenes satelitales de la plataforma Google Earth; allí se reconocieron el embalse Las Canoas, la red hídrica, las áreas cultivadas y los asentamientos humanos. Todo lo anterior fue digitalizado utilizando los sistemas de información geográfica (ArcGIS, QGIS). Además, se estableció la importancia de los elementos dentro de la construcción del modelo, para poder asignarles prioridades en el momento de la incorporación de operaciones.

Demanda de agua

Dentro de esta categoría se incluyeron todas aquellas actividades que requieren el abastecimiento de agua.

Suelo

La información correspondiente a suelos se obtuvo del mapa de cobertura y uso del suelo del año (INETER.2000 y INETER.2018) a partir de la cual se realizó el análisis para un periodo de 18 años. Allí se determinaron los usos que tuvo la cuenca y cómo estos han evolucionado con los años; asimismo, se calculó el área que ocupa cada uno de los usos. De igual manera, se utilizó el mapa de uso potencial de la tierra para el establecimiento de escenarios futuros. Todo el procesamiento geométrico se realizó en herramientas de información geográfica como ArcGIS y QGIS.

Incorporación de información en el modelo

Una vez que se delimitaron el *catchment*, la caracterización de cobertura vegetal y los datos climatológicos, se procedió a incorporar la información dentro del modelo, por medio de la generación del esquema base en WEAP. Los resultados fueron analizados en Excel.

Planteamiento de escenarios de cambio de uso del suelo

De acuerdo con las coberturas identificadas en la cuenca, se consideraron dos posibles escenarios, a partir de los cuales se buscó evaluar el cambio en el régimen hidrológico de la cuenca. El planteamiento de los escenarios se realizó con base en el análisis del cambio de uso del suelo experimentado en el periodo 2000-2018, tomando como referencia la expansión de las áreas de cultivos de arroz por inundación, así como otras coberturas, principalmente pasto y vegetación herbácea. Además, se utilizó información descriptiva y cartográfica del uso potencial de la tierra, pendiente de suelos, tipo de suelo (variables de textura y profundidad) y elevaciones.

Modelación de la cuenca en WEAP

Representación topológica de la cuenca

Para esta representación se emplearon los elementos contenidos en el programa, de tal forma que la cuenca quedó definida mediante la unidad hidrológica, las demandas a través de los sitios de demanda y el río principal se representó con el elemento río. De igual manera, para la representación del método se utilizó el elemento escurrimiento/infiltración.

Representación de las variables físicas de la cuenca

Las características físicas de la cuenca del río Malacatoya se representaron de la siguiente manera: Área: se determinó a partir de la información en formato vector y *rúster* generados por la Dirección de Recursos Hídricos, a través de la definición de las unidades hidrográficas a nivel nacional bajo la metodología Pfafstetter. Coeficiente de cultivo: estos fueron obtenidos de la *Guía para los requerimientos de agua para los cultivos* (FAO, 1990), para cada una de las coberturas de suelo.

Calibración y validación del modelo

El proceso de calibración del modelo desarrollado de acuerdo con el análisis de oferta y demanda de agua se realizó en tres etapas consecutivas, lo que permitió analizar el comportamiento del modelo, primero, en las cuencas aportantes, que corresponden a zonas de régimen natural; luego, en las cuencas intermedias y, finalmente, en las cuencas bajas.

Criterios de eficiencia

Durante el proceso de calibración del modelo hidrológico se buscó ajustar caudales pico y base. De acuerdo con esto, una vez obtenidos los resultados de la calibración de caudales, estos datos se compararon con los registros históricos de las estaciones. El grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados se llevó a cabo a partir del cálculo de los siguientes estadísticos:

Razón de escurrimiento superficial:

$$\%Bias_{RR} = \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{abs,i})}{\sum_{t=1}^N Q_{abs,i}} \times 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

La razón de escurrimiento superficial es el porcentaje de sesgo estadístico relacionado con el total de escurrimiento, cuantificando las diferencias en torno al equilibrio. Sus resultados oscilan entre $(-\infty, +\infty)$, donde 0 % corresponde a la condición de equilibrio perfecto; los valores positivos indican una subestimación de los valores modelados respecto a los observados y, por ende, los valores negativos son indicativos de sobreestimación.

Coefficiente de Nash-Sutcliffe (NS) logarítmico:

$$NS_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(O_i) - \log(M_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(O_i) - \log(\bar{O}))^2} \quad (\text{Ec. 2})$$

El coeficiente NS, tal y como se muestra en la ecuación 2, tiende a sobrevalorar las correspondencias entre caudales altos modelados y observados y subvalora las correspondencias entre caudales bajos. Por lo tanto, aplicar una transformación logarítmica en ambos sets de datos (simulados y observados) es una manera de neutralizar las deficiencias del primero. En la ecuación 2, O_i corresponde a los valores observados y M_i a los simulados. Este índice es uno de los más utilizados y varía desde $-\infty$ a 1. Valores menores a 0 indican que el

promedio de los valores observados representa de mejor manera a la serie observada que los valores simulados. Este criterio sobreestima más el error producido por valores altos que por valores bajos.

En la tabla 1 se describe una clasificación cualitativa del desempeño del índice de Nash-Sutcliffe, construida con base en una escala mensual (Moriassi et al., 2007).

Tabla 1

Clasificación del desempeño del índice de Nash-Sutcliffe

Desempeño	Rango
Insatisfactorio	$N - S \leq 0.5$
Satisfactorio	$0.50 < N - S \leq 0.65$
Bueno	$0.65 < N - S \leq 0.75$
Muy bueno	$0.75 < N - S \leq 1.00$

Fuente: (Moriassi et ál., 2007).

Evaluación a partir del coeficiente r²:

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}} \right)^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

Para la evaluación del coeficiente r² o coeficiente de correlación, este representó la medida estadística del ajuste entre los valores observados y simulados, indicando, entonces, cuánto de la variación total de una variable (dependiente) es explicada por la otra variable (independiente). Es decir, mide la capacidad explicativa del modelo de regresión lineal aplicado a los resultados arrojados durante la simulación.

- Razón de desviación estándar de las observaciones (RSR):

$$RSR = \frac{\text{RMSE}}{\text{STDEV}_{\text{abs}}} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^N (Q_{\text{abs},t} - Q_{\text{sim},t})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (Q_{\text{abs},t} - \bar{Q}_{\text{abs}})^2}} \quad (\text{Ec. 4})$$

El coeficiente conocido como RSR lo que implica es una estandarización del error cuadrático medio (RMSE) utilizando la desviación estándar de las observaciones. Este índice incorpora los beneficios del índice de error estadístico e incluye un factor de normalización. El valor óptimo de RSR que se puede obtener es 0 (cero), lo cual indica variación residual nula, y consecuentemente, la obtención de un modelo perfecto. Entre más pequeño sea el valor de RSR, mejor va a ser el desempeño del modelo.

Porcentaje de Bias FMM (FCD median midflow):

$$\% \text{Bias}_{FMM} = \frac{\log(Q_{\text{sim,med}}) - \log(Q_{\text{abs,med}})}{\log(Q_{\text{abs,med}})} \times 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

El % Bias FMM corresponde al sesgo estadístico relacionado a las diferencias del rango medio de caudales. Funciona bajo la construcción de la curva de duración, extrayendo la información de la mediana estadística

de ambas fuentes de datos, tanto en las mediciones observadas, como también en las mediciones resultantes durante la simulación.

Resultados y discusión

Climatología

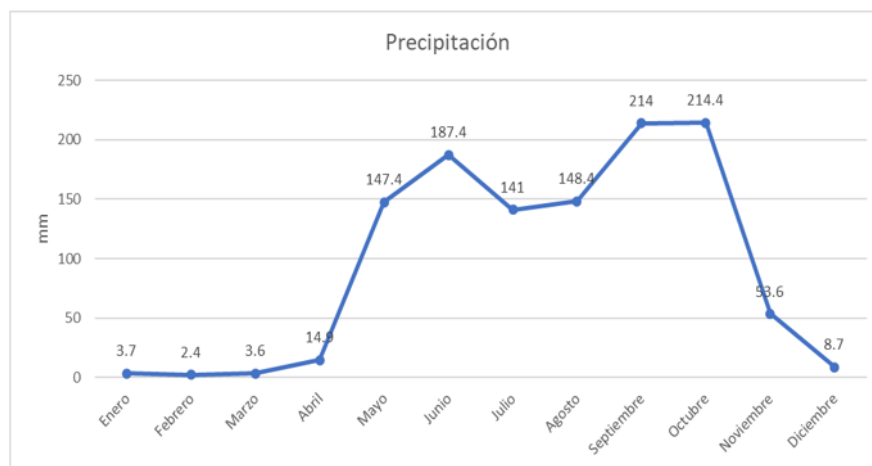
El primer paso en el modelamiento de los datos climáticos fue determinar la extensión y cantidad de datos existentes en las estaciones meteorológicas. A partir de este resultado se determinó el periodo de modelación para la calibración, el cual se establece sobre los años en que los datos de precipitación, temperatura y caudales coinciden. Para elaborar el modelo fue necesario procesar los datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración asociados con el *catchment* definido.

Precipitación

Una vez determinado el periodo de análisis de los datos, se procedió a calcular los promedios mensuales de precipitación de los datos obtenidos de la estación 69027. Como se muestra en la figura 3, las mayores precipitaciones se dieron entre los meses de mayo a octubre, mientras que el promedio más bajo se registró en el mes de febrero.

Figura 3

Precipitación media mensual

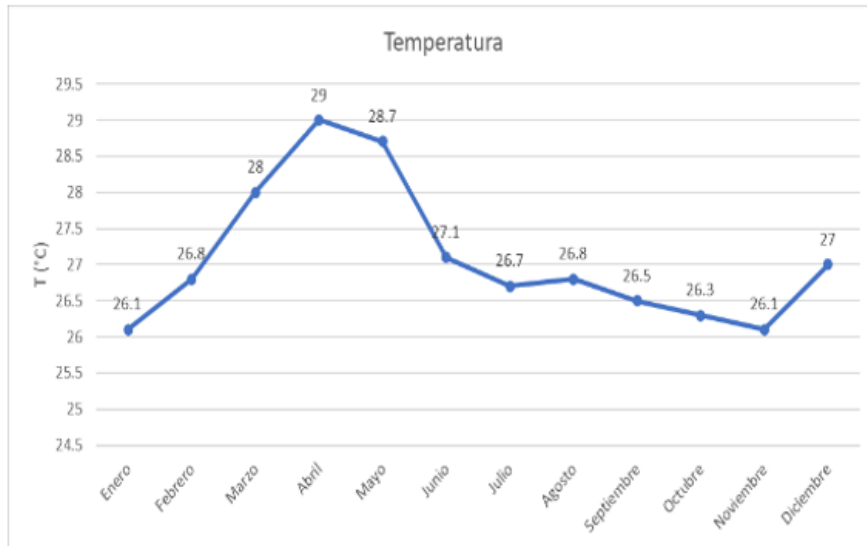


Fuente: elaboración propia.

Temperatura

Los datos de temperatura obtenidos corresponden al mismo rango de análisis de los datos de precipitación y fueron registrados en la estación con código 69027. La mayor temperatura promedio se registró en el mes de abril, que corresponde a la temporada seca en el país (figura 4).

Figura 4
Temperatura media mensual

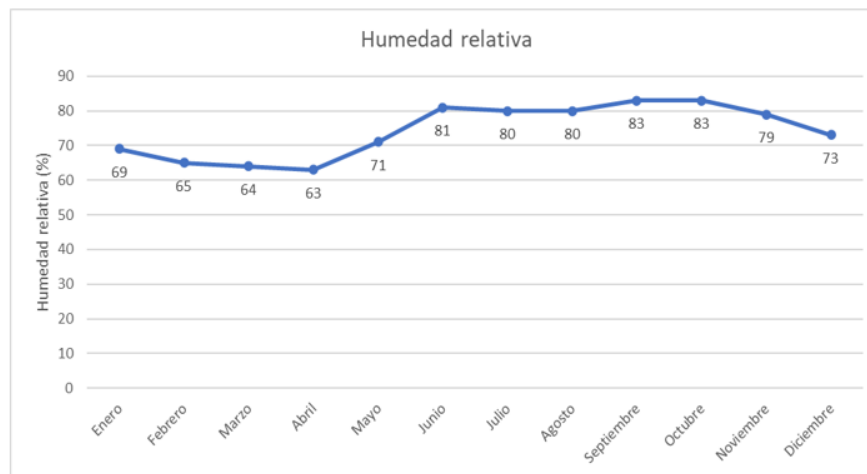


Fuente: elaboración propia.

Humedad relativa y velocidad del viento

Los datos de las variables humedad y viento fueron obtenidos de la estación meteorológica con código 69027. Teniendo en cuenta el periodo de análisis, se obtuvieron los promedios de mensuales mostrados en las figuras 5 y 6.

Figura 5
Humedad relativa media mensual



Fuente: elaboración propia.

Figura 6
 Velocidad del viento media mensual



Fuente: elaboración propia.

Coefficiente de cultivo

Se tomó como base el mapa de cobertura y uso de la tierra para determinar los tipos de coberturas presentes en la cuenca en estudio. Posteriormente, se identificó el coeficiente de cultivo, como se puede ver en la tabla 2.

Tabla 2
 Valores de coeficientes de cultivo

Cobertura	kc	Cobertura	kc
Agua	0	Pasto	0.3
Bosque latifoliado abierto	1	Suelo sin vegetación	0
Bosque latifoliado cerrado	1	Tacotal	0.5
Centros poblados	0	Vegetación arbustiva	0.4
Cultivos anuales	1.15	Vegetación herbácea	0.3

Fuente: elaboración propia.

Información para la calibración del modelo

Para la calibración del modelo se utilizaron los registros de caudales mensuales de la estación Las Banderas, la cual cuenta con información del periodo 1952-1970. En la tabla 3 se muestra la cantidad de datos utilizados:

Tabla 3
Datos registrados de caudales - Las Banderas

Año	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961
Estación Las Banderas	4	12	12	12	12	11	11	12	10	12
	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	
	12	12	12	12	12	11	12	12	8	

Fuente: elaboración propia.

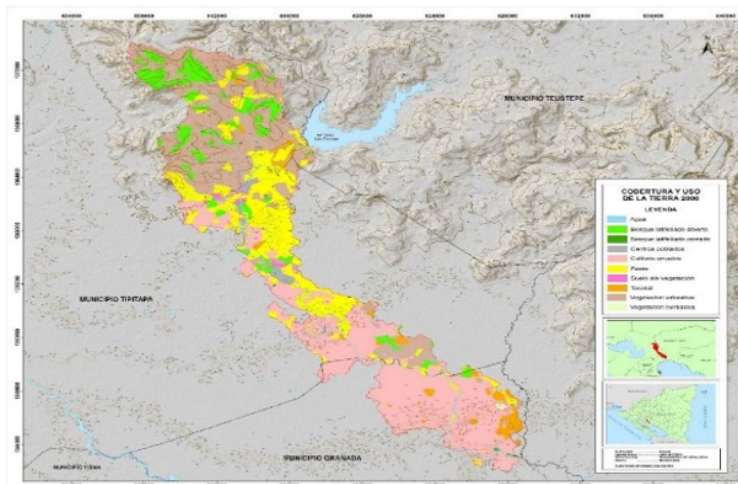
Análisis cobertura y uso de la tierra

Cobertura y uso de la tierra, año 2000

Para el año 2000, el uso de la tierra en la cuenca del río Malacatoya estaba principalmente dominada por cultivos anuales (34.76 %), localizados, sobre todo, en la parte media y baja de la cuenca; seguido de vegetación arbustiva (30.99 %), localizada arriba de la cota 160; por último, en mayor dominancia se encontró el pasto (19.88 %), concentrado en la parte media de la cuenca. En valores menores al 10 % figuran: bosque latifoliado abierto (8.90 %), tacotal (3.18 %), centros poblados (0.89 %), suelo sin vegetación (0.50 %) y suelo sin vegetación (0.11 %) (figura 7).

Figura 7

Mapa de cobertura y uso de la tierra, año 2000.

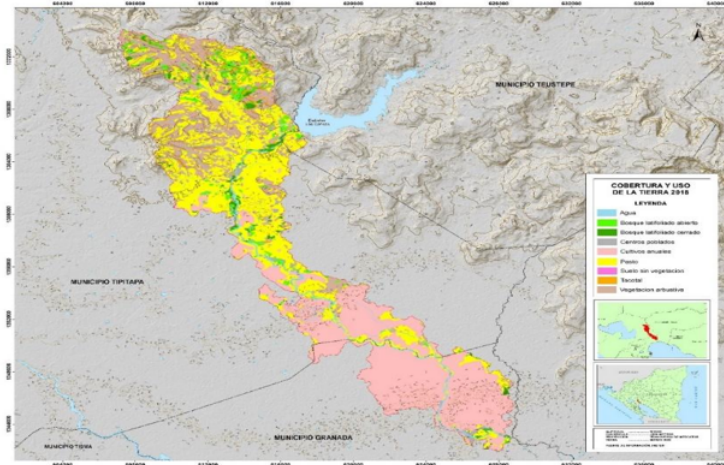


Fuente: elaboración propia.

Cobertura y uso de la tierra, año 2018

Para el 2018, el 35.42 % de la cuenca estuvo ocupada por áreas cultivadas y, con una diferencia de 0.52 %, el pasto ocupó el 34.90 %, distribuido a lo largo de la cuenca; a estos le siguieron la vegetación arbustiva (20.05 %), mayormente localizada en la parte alta y media de la cuenca en estudio. En menores porcentajes de cobertura se localizan: bosque latifoliado abierto (3.88 %), bosque latifoliado cerrado (1.96 %) y tacotal (1.26 %) (figura 8).

Figura 8
 Mapa de cobertura y uso de la tierra, año 2018.



Fuente: elaboración propia.

A continuación, en la tabla 4, se presenta una matriz de comparación correspondiente a los dos periodos de análisis. Allí se puede ver que para el año 2000 se registraban 10 usos de la tierra, mientras que en el año 2018 se redujeron a nueve; las 19.62 ha de vegetación herbácea identificadas en el año 2000 cambiaron su uso a cultivos anuales para el 2018. De igual manera, el bosque latifoliado abierto perdió 886.13 ha de cobertura, las cuales pasaron mayormente a pasto y vegetación arbustiva; al mismo tiempo, el 30.99 % de vegetación arbustiva del año 2000 se redujo a 20.05 % en el 2018, cambiando su uso a pasto y tierras cultivadas, principalmente. Para el caso de los tacotales, 339.66 ha cambiaron su uso a tierras cultivadas y pasto.

Por otro lado, el bosque latifoliado cerrado aumentó su cobertura un 3.88 % respecto al año base, concentrándose especialmente en la parte media y baja de la cuenca como remanente del bosque latifoliado abierto existente en el año 2000. De igual modo, el pasto y los cultivos anuales presentaron un aumento en sus áreas de 2651.77 ha y 115.77 ha, respectivamente.

Tabla 4
 Matriz comparativa uso de la tierra 2000-2018

Usos	Año 2000			Año 2018		
	ha	km ²	Porcentaje	ha	km ²	Porcentaje
Agua	121.32	1.21	0.69%	293.93	2.94	1.66%
Bosque latifoliado abierto	1571.32	15.71	8.90%	685.19	6.85	3.88%
Bosque latifoliado cerrado	16.21	0.16	0.09%	345.77	3.46	1.96%
Centros poblados	157.08	1.57	0.89%	149.62	1.50	0.85%
Cultivos anuales	6137.52	61.38	34.76%	6253.29	62.53	35.42%
Pasto	3510.69	35.11	19.88%	6162.46	61.62	34.90%
Suelo sin vegetación	88.80	0.89	0.50%	3.05	0.03	0.02%
Tacotal	561.65	5.62	3.18%	221.99	2.22	1.26%
Vegetación arbustiva	5471.96	54.72	30.99%	3540.88	35.41	20.05%
Vegetación herbácea	19.62	0.20	0.11%			

Fuente: elaboración propia.

Las tasas de cambio del 2000 al 2018 (tabla 5) fueron positivas para bosque latifoliado cerrado (18.53), pasto (3.18) y cultivos anuales (0.10); mientras que para las coberturas suelo sin vegetación (-17.09), vegetación arbustiva (-5.03), bosque latifoliado cerrado (-4.51) y vegetación arbustiva (-2.39) muestran pérdidas en ese periodo (figura 9 y 10).

Tabla 5

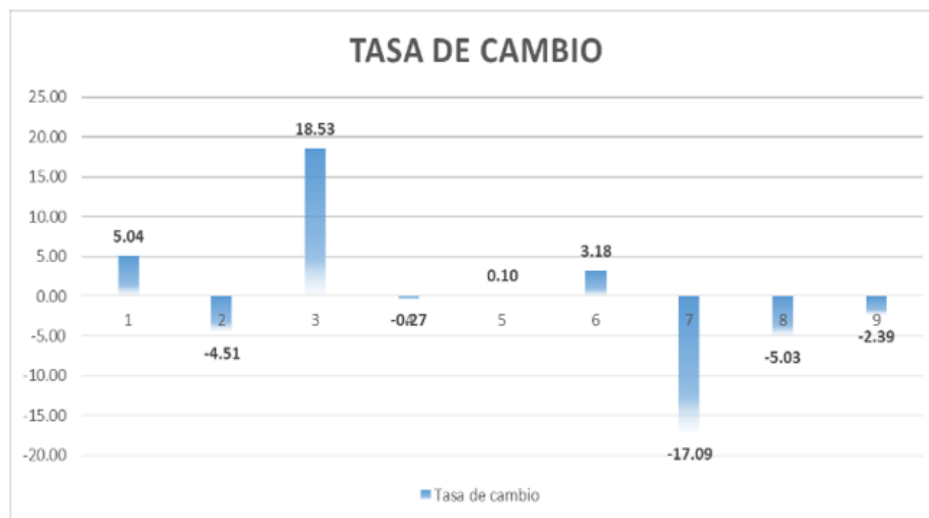
Tasa de cambio de cobertura y uso de la tierra

	USOS2018	Agua	Bosque latifoliado abierto	Bosque latifoliado cerrado	Centros poblados	Cultivos anuales	Pasto	Suelo sin vegetación	Tacotal	Vegetación arbustiva	Totales	Tasa de cambio
Uso 2000	Agua	0.64	0.05	0.12	0.02	0.04	0.30	0.00	0.02	0.02	1.22	5.04
	Bosque latifoliado abierto	0.12	1.51	0.58	0.00	1.13	5.16	0.00	0.56	6.67	15.73	-4.51
	Bosque latifoliado cerrado	0.02	0.00	0.07	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.02	0.17	18.53
	Centros poblados	0.20	0.23	0.00	0.50	0.02	0.54	0.00	0.02	0.02	1.51	-0.27
	Cultivos anuales	0.72	0.18	0.24	0.53	52.72	6.80	0.00	0.00	0.28	61.48	0.10
	Pasto	0.96	1.48	0.95	0.36	1.40	24.10	0.01	0.37	5.46	35.10	3.18
	Suelo sin vegetación	0.09	0.05	0.03	0.04	0.00	0.63	0.00	0.03	0.03	0.90	-17.09
	Tacotal	0.11	0.30	0.46	0.00	3.27	1.23	0.00	0.10	0.19	5.66	-5.03
	Vegetación arbustiva	0.10	3.10	1.08	0.06	3.78	22.62	0.02	1.10	22.75	54.60	-2.39
	Vegetación herbácea	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	
	Totales	2.97	6.90	3.54	1.51	62.56	61.41	0.03	2.19	35.44	176.56	

Fuente: elaboración propia.

Figura 9

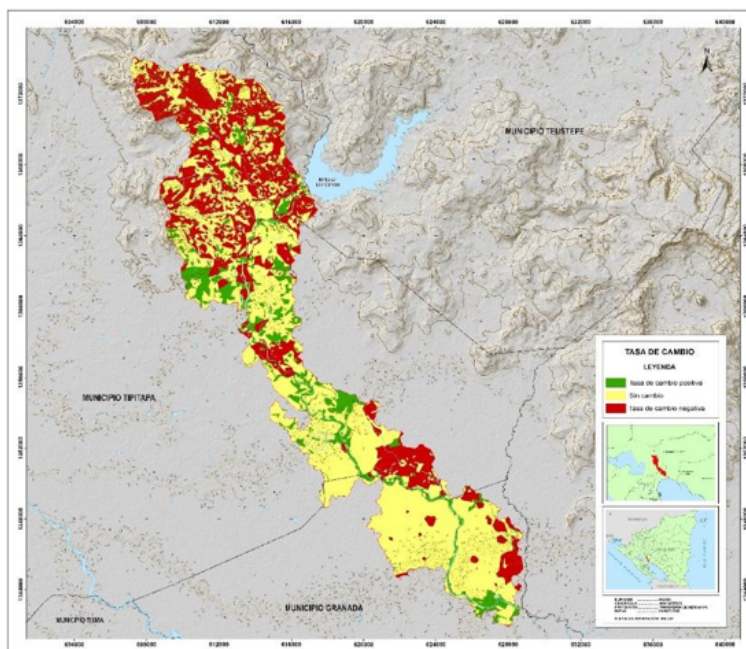
Variación tasa de cambio



Fuente: elaboración propia.

Figura 10

Mapa de tasa de cambio del uso y cobertura del suelo, unidad hidrográfica (UH) Malacatoya



Fuente: elaboración propia.

Planteamiento de escenarios de cobertura y uso de la tierra para el año 2030

A partir del análisis anterior, se planteó el cambio de uso de suelo para el año 2030, con una propuesta de dos escenarios potenciales: el primero hace referencia a una cobertura del suelo a partir del uso potencial de la tierra, de tal forma que aporte al manejo de la cuenca; por su parte, el segundo está basado en la cobertura y uso actual del suelo y su potencial expansión de acuerdo con las actividades que se desarrollan mayoritariamente en la cuenca.

Escenario 1: uso potencial de la tierra (óptimo)

Las categorías de uso propuestas (tabla 6) se han definido de acuerdo con el uso potencial de la tierra de la República de Nicaragua para el año 2021 (con ajustes para su representación a escala de la cuenca nivel 6 según Pfafetter), y se consideró el tipo de suelo, su textura y la clase de capacidad de uso.

Se planteó realizar actividades de vocación principalmente agroforestal (bosque latifoliado abierto), que combinaran como mínimo dos especies de plantas que interactúen biológicamente (una especie leñosa permanente y otras manejadas con fines agrícolas, incluyendo pastos), de tal forma que mantuvieran y mejoraran la estabilidad de los sistemas agrícolas y/o pecuarios, utilizando bajos niveles de insumo para proteger los suelos de la degradación y favorecer la productividad, con la finalidad de recuperar áreas degradadas y/o con usos inadecuados.

De igual manera, se propuso el sistema agrícola intensivo (cultivos anuales) en el que el arroz fue el rubro de mayor importancia y constituyó el eje central de todas las actividades productivas. La parte baja de la cuenca se planteó como área potencial para el cultivo, ya que sus suelos presentaban las condiciones para la mayor

productividad y rendimiento, implementando prácticas de conservación de suelos y agua.

Tabla 6

Cobertura de la tierra- escenario 1

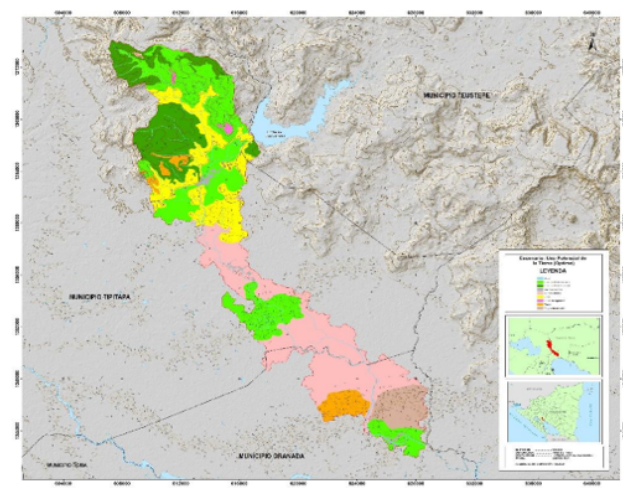
Tipo de uso / cobertura	ha	km ²	Porcentaje
Agua	45.40	0.45	0.26%
Bosque latifoliado abierto	5,131.53	51.32	29.06%
Bosque latifoliado cerrado	2,801.11	28.01	15.86%
Centros poblados	199.90	2.00	1.13%
Cultivos anuales	5,032.47	50.32	28.50%
Pasto	2,557.60	25.58	14.49%
Suelo sin vegetación	81.87	0.82	0.46%
Tacotal	791.49	7.91	4.48%
Vegetacion arbustiva	1,014.60	10.15	5.75%
Total	17,655.96	176.56	100.00%

Fuente: elaboración propia.

El sistema de protección y conservación de los recursos naturales (bosque latifoliado cerrado), (figura 11) se sugirió para la parte alta de la cuenca, arriba de la cota 160, con pendientes mayores al 15 %, texturas de suelo franco-arcilloso, franco-arenoso y franco-arcilloso limoso, con alta retención de humedad y zonas donde el material parental está aflorando debido a la erosión del suelo, con la finalidad de rehabilitar todas aquellas áreas degradadas, regenerar el bosque y proteger la biodiversidad.

Figura 11

Mapa propuesto para el escenario 1



Fuente: elaboración propia.

Otra de las actividades económicas realizadas en la cuenca es la ganadería. Los sistemas agrosilvopecuarios (pastos y tacotales) asocian cultivos, pastos, árboles y ganadería que, en conjunto, permiten superar limitaciones que por sí solos provocarían un deterioro del suelo y pérdida de biodiversidad. Los principales beneficios de estos sistemas son: obtención de madera, leña, forraje, alimentos, pastoreo en plantaciones y en bosque natural.

Escenario 2: crecimiento exponencial del uso actual del suelo (expansivo)

El segundo escenario se representó de acuerdo con la cobertura y uso de la tierra del año 2018 (tabla 7), siguiendo la tendencia de uso que se reflejó en el periodo de análisis 2000-2018. Este modelo mostró una disminución de los cuerpos de agua, debido a su extracción para riego de cultivos, y por el deterioro ambiental de la cuenca.

Tabla 7

Cobertura de la tierra- escenario 2

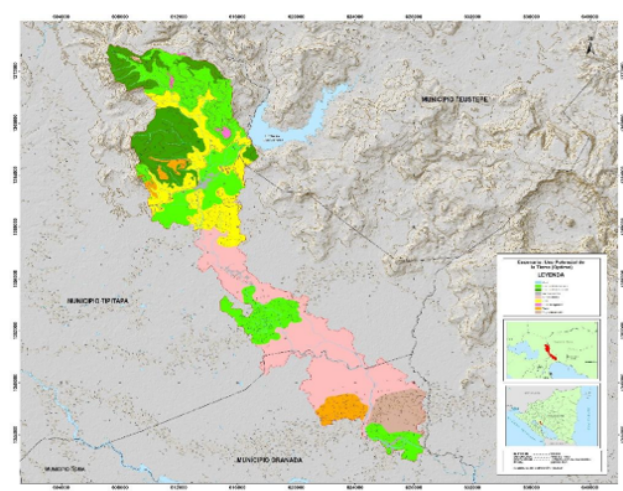
Tipo de uso / cobertura	ha	km ²	Porcentaje
Agua	283.28	2.83	1.60%
Bosque latifoliado abierto	484.96	4.85	2.75%
Bosque latifoliado cerrado	148.47	1.48	0.84%
Centros poblados	261.56	2.62	1.48%
Cultivos anuales	7,156.88	71.57	40.53%
Pasto	5,332.69	53.33	30.20%
Suelo sin vegetación	197.08	1.97	1.12%
Tacotal	353.89	3.54	2.00%
Vegetación arbustiva	3,437.37	34.37	19.47%
Total	17,656.17	176.56	100.00%

Fuente: elaboración propia.

Igualmente, las áreas ocupadas por el bosque latifoliado abierto y cerrado (figura 12) se vieron reducidas por la extracción de madera y el establecimiento de áreas cultivables, pasto y/o ganado. En el caso del pasto y la vegetación arbustiva, las áreas se vieron reducidas por el sobreuso de la tierra, aumentando las áreas de suelo sin vegetación. Asimismo, los centros poblados y cultivos anuales incrementaron sus áreas por el crecimiento poblacional y por mayor demanda de granos básicos.

Figura 12

Mapa propuesto para el Escenario 2.



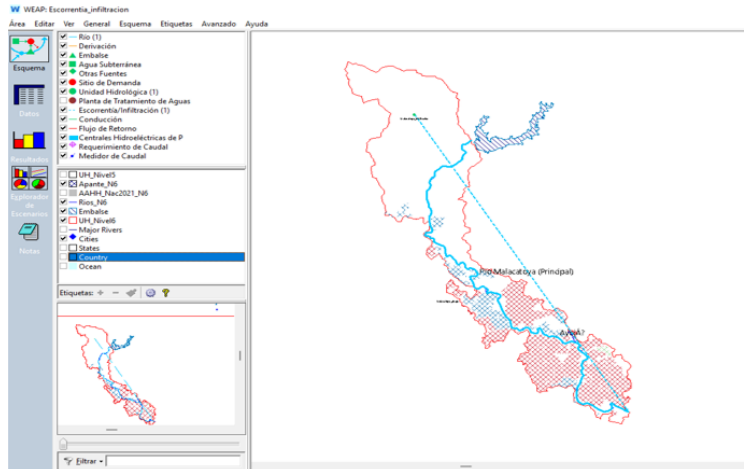
Fuente: elaboración propia.

Representación de procesos hidrológicos de la cuenca

En este capítulo se representan los principales elementos que conforman la unidad hidrográfica Malacatoya, en la que se localiza el río del mismo nombre (figura 13).

Figura 13

Representación esquemática de la cuenca en WEAP



Fuente: elaboración propia.

Método lluvia escurrimiento (método de la humedad de suelo)

Este método representa la cuenca con dos capas de suelo. En la capa superior simula la evapotranspiración, la escurrimiento, el interflujo poco profundo y los cambios en la humedad del suelo. Por su parte, en la capa inferior del suelo se simula el enrutamiento del caudal base al río y el cambio en la humedad de suelo.

Calibración

Se realizó el modelamiento de los datos en WEAP, donde en primera instancia se presentan los caudales de entrada y salida por clase de uso de suelo, siendo estos los datos de referencia para la calibración del modelo (figura 14), calculados a partir de los promedios mensuales (tabla 8).

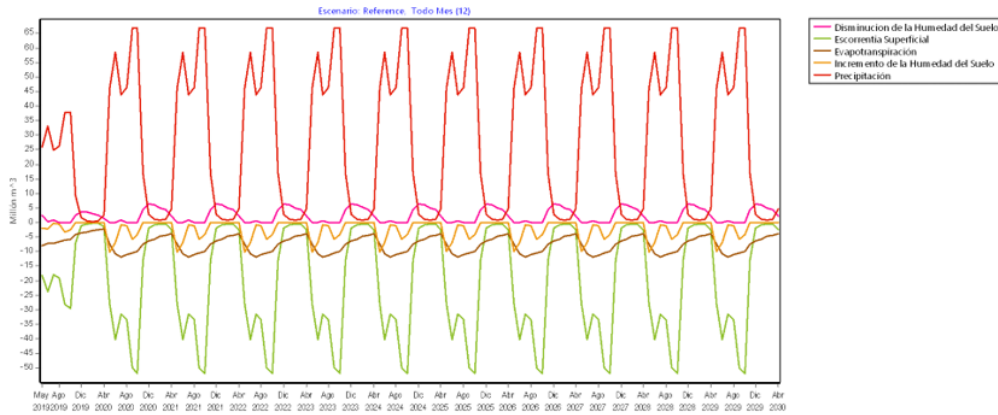
Tabla 8

Escenario de referencia de los caudales de entrada y salida por clase de suelo modelados por WEAP

Escenario mensual promedio de los años (2020-2030)	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Disminución de la Humedad del Suelo	0.224	0.022	0.671	0.01	0.004	0.004	4.228	6.093	5.817	4.883	4.283	2.047
Escurrimiento Superficial	27.05	38.867	30.167	31.953	47.925	49.864	12.35	1.895	0.745	0.441	0.595	2.301
Evapotranspiración	7.456	0.331	1.373	0.735	0.038	9.608	7.192	6.104	5.517	4.531	4.161	3.611
Incremento de la Humedad del Suelo	-9.32	6.341	-0.702	-1.108	5.581	4.021	-0.001	0	0	0	0	-0.016
Precipitación	44.138	56.116	42.222	44.438	64.201	64.201	16.05	2.605	1.108	0.719	1.078	4.462

Fuente: elaboración propia.

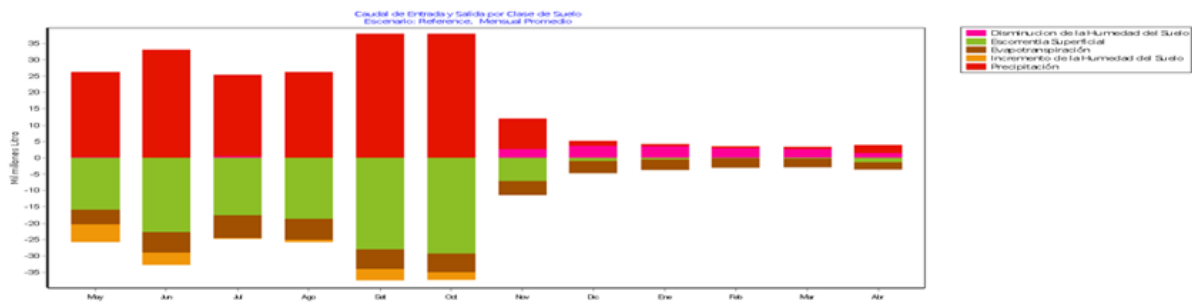
Figura 14
 Caudales de entrada y salida a partir de la simulación en WEAP



Fuente: elaboración propia.

En este sentido, entre las tendencias que relaciona el modelo se puede observar que a medida que el orden de precipitación aumenta en la subcuenca, aumenta la humedad del suelo, y cuando este se satura, aumenta también la escorrentía superficial. Sin embargo, la disminución de la humedad del suelo se ve afectada por la disminución de la precipitación en la cuenca para el periodo 2020-2030, por lo que estas dos variables tienen un comportamiento inversamente proporcional, como se observa en la figura 15.

Figura 15
 Comportamiento de la dependencia de los caudales de entrada y salida por clase de suelo



Fuente: elaboración propia.

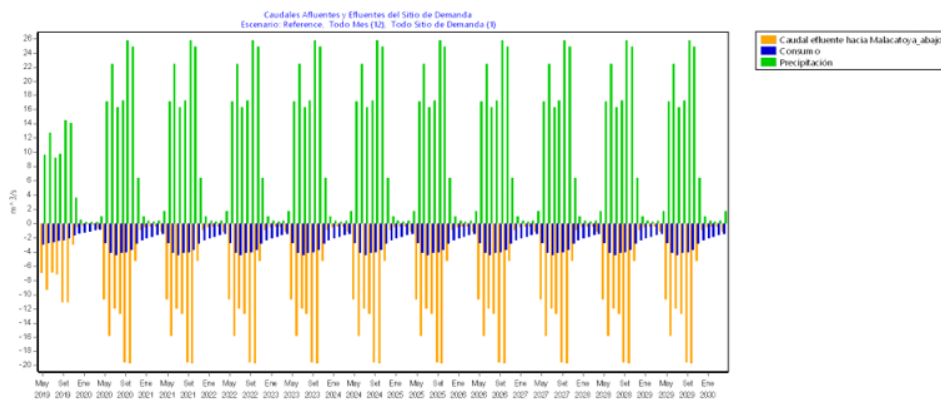
Posteriormente, se muestran los resultados modelados para todo el sitio de demanda, conducidos por la rutina de asignación que determina la entrega final a cada nodo de demanda, a partir de los datos de entradas caracterizados por el modelo como escenario de referencia, en donde se describen el comportamiento del caudal efluente de la subcuenca Malacatoya, el consumo promedio mensual y la precipitación promedio mensual (figura 16).

Tabla 9
 Caudales de entrada y salida por tramos modelados por WEAP

Escenario mensual promedio de los años (2020-2030)	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Caudal efluente hacia Malacatoya_abajo	-27.642	-39.496	-30.816	-32.609	-48.611	-50.59	-3.076	-2.584	-1.397	-1.062	-1.192	-2.88
Consumo	7.456	10.331	11.373	10.735	10.038	9.608	7.192	6.104	5.517	4.531	4.161	3.611
Precipitación	44.138	56.116	42.222	44.438	64.201	64.201	16.05	2.605	1.108	0.719	1.078	4.462
Sum	9.04	6.289	0.033	1.094	5.553	4.003	-4.218	-6.083	-5.806	-4.874	-4.274	-2.029

Fuente: elaboración propia.

Figura 16
 Resultados modelados para todo el sitio de demanda



Fuente: elaboración propia.

Después, se realizó la simulación para generar los resultados para el periodo comprendido desde el 2019 al 2030, a partir de las condiciones de entrada. Los resultados generados por el modelamiento en WEAP se observan en las figuras 17 y 18.

Figura 17
 Modelamiento en WEAP



Fuente: elaboración propia.

Figura 18

Comportamiento de los caudales de entrada y salida por clase de suelo, simulados para el periodo 2019-2030



Fuente: elaboración propia.

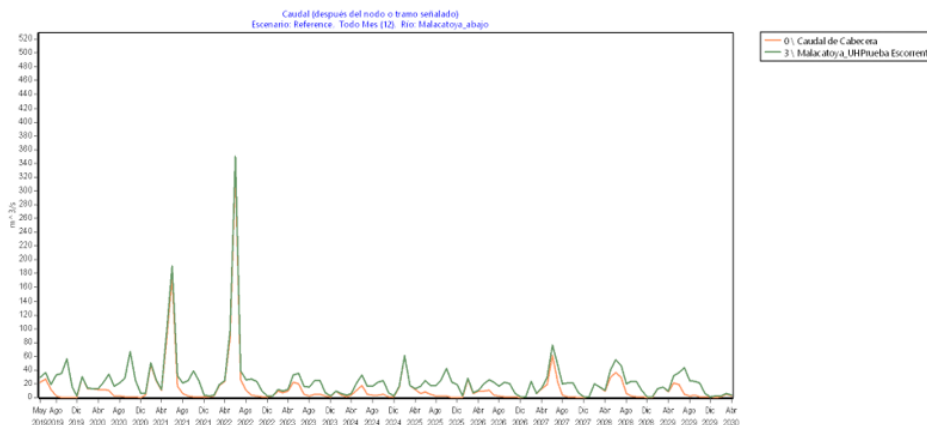
Evaluación de la simulación

Generalmente se busca ajustar los caudales pico y base en este sentido: si se aumenta la respuesta de caudales pico o base, se debe ajustar la escorrentía superficial, la cual es directamente afectada por el factor de resistencia a la escorrentía RRF y conductividad en la zona radicular ks, los cuales afectan la reactividad de los *catchments*; por otro lado, si se quiere afectar los caudales base, se deben ajustar f y Kd. Nótese que la relación entre los diferentes términos de la ecuación es no-lineal y, por lo tanto, al afectar un término, se afectan los otros de forma indirecta.

Para la evaluación del desempeño simulado, se procedió a la simulación de los caudales observados conforme a las condiciones previamente modeladas en el *software* WEAP para la subcuenca del río Malacatoya. Posteriormente, se extrapolaron los caudales observados con los caudales simulados, como se puede observar en la figura 19, en la que se describen los caudales después del nodo o tramo señalado.

Figura 19

Simulación de los caudales observados vs. caudales simulados



Fuente: elaboración propia.

Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y los valores modelados en la

calibración para la subcuenca del río Malacatoya, el índice de Nash-Sutcliffe resultó en - 0.41, donde los valores menores a 0 indican que el promedio de los valores observados representa de mejor manera a la serie observada que los valores simulados. En cuanto al índice de Bias en 66.8 %, este último demuestra que hay una sobreestimación moderada de los caudales simulados, ya que los datos históricos no presentan registros de los caudales en algunos periodos de trabajos con los que se disponían (figura 20); sin embargo, la correlación de los resultados calibrados para el periodo de 1953 a 1970 de la estación colocada como punto de referencia es de 0.79, lo que indica una correlación de los caudales en un 79 %.

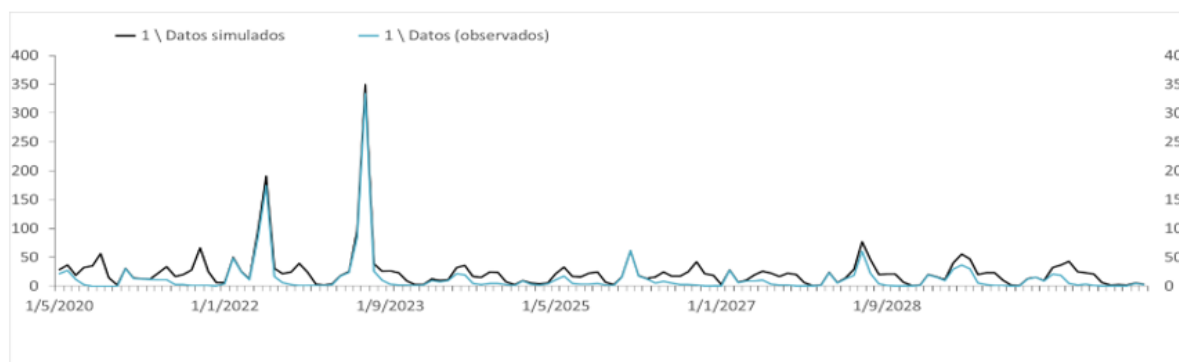
Una vez calibrado el modelo con un coeficiente de correlación aceptable, se procedió a la validación de la simulación a partir de los caudales observados para el periodo de 1953 a 1970 de la estación Las Banderas con los caudales simulados para el periodo propuesto de 2019 al 2030, en donde se muestra un desempeño satisfactorio (tabla 10). Esto se debe a que entre los resultados observados y los resultados simulados el índice de Nash-Sutcliffe es de 0.83 y el Bias relativo es del 75.2 %, lo que implica un desempeño muy bueno, según la clasificación cualitativa del desempeño del índice de Nash-Sutcliffe, construida con base en una escala mensual (Moriassi et al., 2007).

Tabla 10
 Evaluación del desempeño de la simulación

Calibración		
Stat	Value	User notes
NSE C Malacatoya	-0.41	Nash sufcliffe efficiency of streamflow (1953 - 1970)
RMSE C Malacatoya	17.5	Root mean squared error rmse = sqrt(mean((sim- obs)^2)
PBIAS C Malacatoya	66.8%	Relative bias
R ² C Malacatoya	0.79	Correlation coefficient
Validación		
NSE V Malacatoya	0.83	Nash sufcliffe efficiency of streamflow (2019 - 2030)
RMSE V Malacatoya	14.96	Root mean squared error rmse = sqrt(mean((sim- obs)^2)
PBIAS V Malacatoya	75.2%	Relative bias
R ² V Malacatoya	0.92	Correlation coefficient

Fuente: elaboración propia.

Figura 20
 Correspondencia entre los datos observados y simulados



Fuente: elaboración propia.

En cuanto al coeficiente de correlación de la validación realizada, los resultados modelados indican que existe

una buena correlación en la distribución temporal del caudal observado y los caudales simulados para la subcuenca del río Malacatoya, con un $R^2 = 0.92$, lo que indica un 92 % de correlación durante la simulación del periodo 2019-2030.

Simulación de escenarios

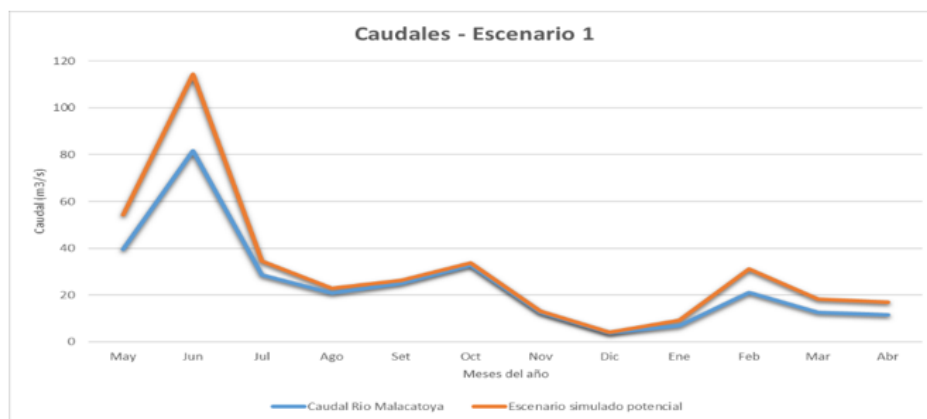
Calibrados los datos del modelaje, se realizaron simulaciones para determinar el comportamiento del caudal del río de cabecera, a partir de cambios en las coberturas del suelo. Los escenarios realizados fueron:

Escenario 1: uso potencial de la tierra (óptimo)

Se consideró el aumento de la cobertura del bosque latifoliado abierto en un 25.18 % (Figura 21), basado en el uso potencial del suelo, las áreas con pendientes mayores al 15 % y los suelos que presentan una degradación física, así como el aumento de la cobertura del bosque latifoliado cerrado en la parte alta de la cuenca (13.9 %); las áreas de cultivos intensivos se redujeron un 6.92 %. Sin embargo, se propone implementar sistemas agroforestales que combinan los cultivos, ya sean anuales o perennes, con especies forestales.

Figura 21

Caudales de cabecera – caudales escenario 1

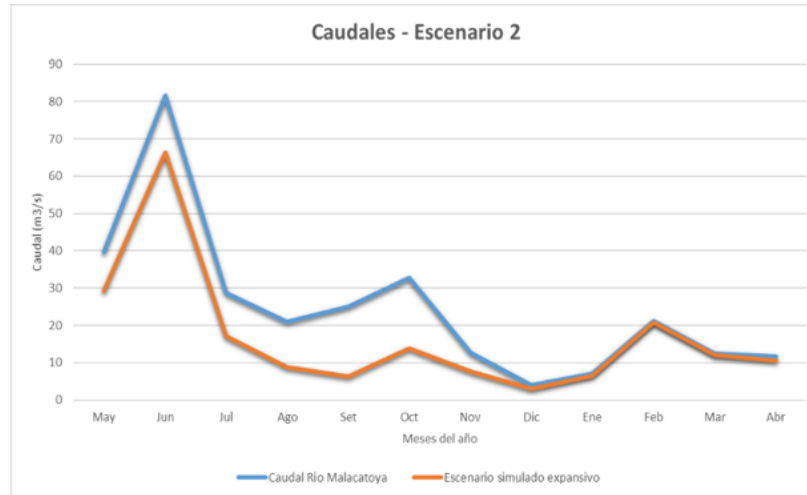


Fuente: elaboración propia.

Escenario 2: crecimiento exponencial del uso actual del suelo (expansivo)

Para este escenario se consideró principalmente un aumento de las áreas de cultivos en un 5.11 %, De igual manera, crecieron las áreas de suelo sin vegetación como producto de la degradación del suelo de la cuenca. Las áreas de bosque latifoliado cerrado y abierto disminuyeron en 1.13 % y 1.12 %, respectivamente.

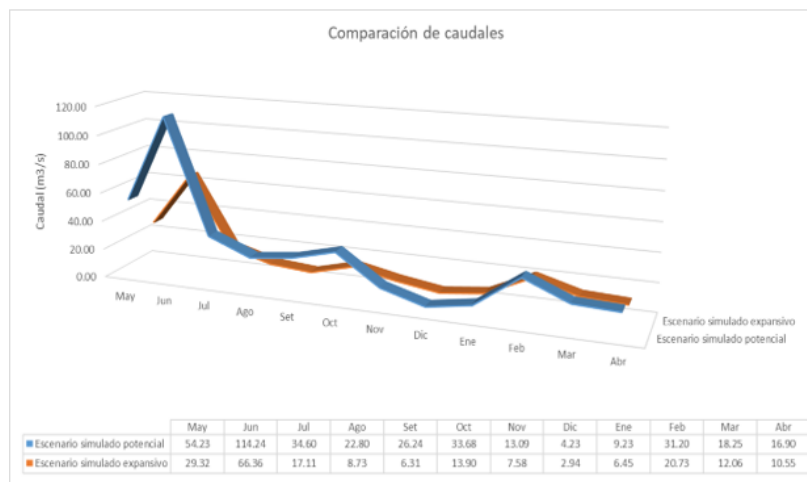
Figura 22
 Caudales de cabecera – caudales escenario 2



Fuente: elaboración propia.

A partir de los escenarios representados en las figuras 21 y 22, se puede observar que existe una variación en los niveles de agua escurrida en el cauce principal del río, que, para el caso del escenario 1, aumenta para el cambio de usos del suelo. En la figura 23 se presentan, en conjunto, los caudales simulados para ambos escenarios.

Figura 23
 Comparación de caudales de escenarios 1 y 2



Fuente: elaboración propia.

La figura 23 permite identificar que los dos escenarios simulados presentan cambios en el volumen de agua escurrida en relación con el caudal base del modelo. Para el caso del escenario 1, los caudales suman un total de 378.68 m³/anual, incrementando el volumen disponible de agua de la cuenca; mientras que para el escenario

2 se obtuvo una disminución de los caudales resultantes del modelamiento, producto de la degradación de los suelos de la cuenca y de las extensas áreas de cultivo y pasto, lo que genera una mayor evapotranspiración y reduce la disponibilidad de agua en la cuenca.

Conclusiones

La unidad hidrográfica nivel 6, con código 69-952584 (de acuerdo con la clasificación Pfafetter), correspondiente al río Malacatoya, se localiza al norte del lago Cocibolca y es compartida por tres municipios: Tipitapa, Granada y Teustepe. Posee un área de 176.55 km², presenta una forma alargada con un coeficiente de compacidad igual a 2.73, un perímetro de 129.59 km y una pendiente y elevación media de 11.11 % y 140 m s. n. m., respectivamente. La longitud total del cauce principal, que lleva por nombre río Malacatoya, es de 42.48 km.

A partir de la calibración del modelo, se realizó la simulación a través del cambio de uso de suelo, planteando dos escenarios diferentes: el escenario 1, una cobertura con base en su uso potencial y adecuado; y el escenario 2, con el aumento de las áreas de cultivo y pasto. La modelación evidenció que en ambos escenarios se presentan cambios opuestos en los caudales del río Malacatoya, aumentando en el caso del escenario 1 y disminuyendo para el caso del escenario 2.

Por otro lado, se pudo observar que los dos escenarios simulados presentan cambios en el volumen de agua escurrida en relación con el caudal base del modelo. Para el escenario 1, los caudales suman un total de 378.68 m³/anual, incrementando el volumen disponible de agua anual de la cuenca en un 56.65 %. Mientras que para el escenario 2 se obtuvo una disminución de disponibilidad de agua anual para un 18.75 % de los caudales resultantes del modelamiento, producto de la degradación de los suelos de la cuenca y las extensas áreas de cultivo y pasto, que producen una mayor evapotranspiración y reducen la disponibilidad de agua en la cuenca. Es importante destacar que la cobertura y uso de suelo son factores decisivos en la disponibilidad de agua a nivel de la cuenca, ya que regulan los procesos hidrológicos de la misma.

De acuerdo con los estadísticos de eficiencia obtenidos en el desarrollo de este proyecto, la calibración realizada para la subcuenca del río Malacatoya, dentro de la región de estudio, se considera adecuada con respecto al coeficiente de correlación de 0.79, para un índice de Nash de - 0.41, donde los valores menores a 0 indican que el promedio de los valores observados representa de mejor manera a la serie observada que los valores simulados. Frente a las dudas relacionadas con la calibración, fue posible validar la simulación para corroborar los resultados modelados contra los observados, donde los resultados se consideran satisfactorios para el propósito de esta investigación (0.7 NSE 0.8), pues se presentó un índice de Nash-Sutcliffe de 0.83 y un Bias relativo del 75.2 %, lo que implica un desempeño muy bueno según la clasificación cualitativa del desempeño del índice de Nash-Sutcliffe, construida con base en una escala mensual. La evaluación del desempeño fue de igual manera validada por medio del coeficiente de correlación entre los resultados observados para el periodo 1953-1970 de la estación de referencia (Las Banderas), con los caudales simulados para el periodo propuesto 2019-2030, generando un $R^2 = 0.92$ e indicando un 92 % de correlación durante el periodo simulado.

Referencias

- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). (1989). *Mapas topográficos de la República de Nicaragua a escala 1:50 000 (Hojas 2952-I, 2953-II, 3052-III, 3053-III, 3053-IV)*. Mapas impresos; INETER.
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). (2000). *Mapa de cobertura y uso del suelo de la República de Nicaragua: Año 2000*. Mapa temático; INETER Geoportal de usos de la tierra.
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). (2018). *Mapa de cobertura y uso del suelo de la República de Nicaragua: Año 2018*. Mapa temático; INETER Geoportal de usos de la tierra.

- Moriasi, D., Arnold, J., Liew, M. V., Binger, R., Hermel, D., & Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeleval.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1990). *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO.
- Salinas Villafañe, A. A., & Paz Rada, O. (2011). *Modelo de planificación hídrica de cuencas WEAP aplicado al proyecto: Aducción de recursos hídricos Mururata* [Trabajo de grado]. Universidad Mayor de San Andrés.