

Modelo de aprendizaje automático como herramienta para la toma de decisiones en la cuenca del río Ariporo

López Romero, María Fernanda; Rodríguez Torres, Mariana Alejandra; Tejada Henríquez, Luisa María; Forero Buitrago, Gonzalo Alberto

María Fernanda López Romero

mflopezr@unbosque.edu.co

Universidad El Bosque, Colombia

Mariana Alejandra Rodríguez Torres

marodriguezr@unbosque.edu.co

Universidad El Bosque, Colombia

Luisa María Tejada Henríquez

ltejadah@unbosque.edu.co

Universidad El Bosque, Colombia

Gonzalo Alberto Forero Buitrago

gforerob@unbosque.edu.c

Universidad El Bosque, Colombia

INVENTUM

Corporación Universitaria Minuto de Dios, Colombia

ISSN: 1909-2520

ISSN-e: 2590-8219

Periodicidad: Semestral

vol. 16, núm. 31, 2021

inventum@uniminuto.edu

Recepción: 30 Mayo 2021

Aprobación: 20 Junio 2021

Publicación: 15 Julio 2021

URL: <http://portal.amelica.org/amei/journal/671/6713631010/>

Corporación Universitaria Minuto De Dios - UNIMINUTO



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

Resumen: En la cuenca del río Ariporo, localizada en el departamento del Casanare, en el oriente colombiano, se han presentado desastres ecológicos, como la alta mortandad de animales; por ejemplo, la sucedida en el año 2014, a causa de una fuerte sequía. Por ello, ante la necesidad de promover medidas relativas al uso del suelo para esta cuenca, se elaboró un diseño metodológico en tres fases: 1) el diagnóstico hidrológico de la cuenca utilizando ciencia de datos y sensores remotos, 2) la elaboración de un modelo matemático utilizando un balance de materia, con el fin de visualizar la dinámica entre la lluvia y los datos de caudal de la estación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), y 3) la recomendación de estrategias frente al uso de suelo para la cuenca, de acuerdo con la información recolectada. A partir del piloto obtenido, se observó que el aporte de agua subterránea es indispensable en la temporada de sequía, por lo que se concluye que es necesario plantear estrategias productivas para el ordenamiento territorial de la cuenca, que maximicen la infiltración de agua lluvia (abril, mayo, junio y agosto), con el fin de que esta agua penetre en el suelo y llegue a los acuíferos subterráneo, donde por gravedad el agua sale lentamente al río durante la temporada de sequía (noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo). Para tal fin, se requiere una planeación adecuada del uso del suelo en la región, en la que se incluya la disminución en la deforestación para establecer pasturas para ganadería, promoviendo estrategias como los VAC systems que aprovechan embalses al máximo para la producción de alimento para su vez que maximizar la infiltración de agua lluvia en los acuíferos, si son construidos en tierra.

Palabras clave: aprendizaje automático, hidrología, cuenca del río Ariporo.

Abstract: In the Ariporo river basin, located in the department of Casanare, in eastern Colombia, there have been ecological disasters, such as high animal mortality, for example, the one that occurred in 2014, due to a severe drought. Therefore, given the need to promote measures related to land use for this basin, a methodological design was developed in three phases: 1) the hydrological diagnosis of the basin using data science and remote sensors, 2) the development of a mathematical model using a balance of matter, in order to visualize the dynamics between rainfall and flow data from the station of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM),

and 3) the recommendation of strategies regarding land use for the basin, according to the information collected. From the pilot obtained, it was observed that the contribution of groundwater is indispensable during the dry season, so it is concluded that it is necessary to propose productive strategies for the territorial planning of the basin, which maximize the infiltration of rainwater (April, May, June and August), so that this water penetrates the soil and reaches the subway aquifers, where by gravity the water comes out slowly to the river during the dry season (November, December, January, February and March). To this purpose, an adequate land use planning in the region is required, including deforestation reduction to establish pastures for livestock, promoting strategies such as VAC systems that take full advantage of reservoirs for food production while maximizing rainwater infiltration into aquifers, if they are built on a land-based system.

Keywords: machine learning, hydrology, Ariporo river basin.

Resumo: Na bacia do rio Ariporo, localizada no departamento de Casanare, no leste da Colômbia, ocorreram desastres ecológicos, como a alta mortalidade animal, por exemplo, a que ocorreu em 2014, devido a uma grave seca. Portanto, dada a necessidade de promover medidas de uso do solo para esta bacia, foi desenvolvido um projeto metodológico em três fases: 1) o diagnóstico hidrológico da bacia usando ciência de dados e sensores remotos, 2) o desenvolvimento de um modelo matemático usando um balanço da matéria, a fim de visualizar a dinâmica entre os dados de precipitação e fluxo da estação do Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais (IDEAM), e 3) a recomendação de estratégias de uso do solo para a bacia, de acordo com as informações coletadas. A partir do estudo piloto obtido, observou-se que a contribuição das águas subterrâneas é indispensável durante a estação seca e, portanto, conclui-se que é necessário propor estratégias produtivas para o planejamento territorial da bacia, que maximizem a infiltração da água da chuva (abril, maio, junho e agosto), para que esta água penetre no solo e chegue aos aquíferos subterrâneos, onde por gravidade a água flui lentamente para o rio durante a estação seca (novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março). Para isso, é necessário um planejamento adequado do uso da terra na região, incluindo a redução do desmatamento para estabelecer pastagens para gado, promovendo estratégias como sistemas VAC que aproveitam ao máximo os reservatórios para a produção de ração, maximizando a infiltração da água da chuva nos aquíferos, se estes forem construídos em terra.

Palavras-chave: aprendizagem mecânica, hidrologia, bacia do rio Ariporo.

Modelo de aprendizaje automático como herramienta para la toma de decisiones en la cuenca del río Ariporo

Resumen

En la cuenca del río Ariporo, localizada en el departamento del Casanare, en el oriente colombiano, se han presentado desastres ecológicos, como la alta

mortandad de animales; por ejemplo, la sucedida en el año 2014, a causa de una fuerte sequía. Por ello, ante la necesidad de promover medidas relativas al uso del suelo para esta cuenca, se elaboró un diseño metodológico en tres fases: 1) el diagnóstico hidrológico de la cuenca utilizando ciencia de datos y sensores remotos, 2) la elaboración de un modelo matemático utilizando un balance de materia, con el fin de visualizar la dinámica entre la lluvia y los datos de caudal de la estación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), y 3) la recomendación de estrategias frente al uso de suelo para la cuenca, de acuerdo con la información recolectada. A partir del piloto obtenido, se observó que el aporte de agua subterránea es indispensable en la temporada de sequía, por lo que se concluye que es necesario plantear estrategias productivas para el ordenamiento territorial de la cuenca, que maximicen la infiltración de agua lluvia (abril, mayo, junio y agosto), con el fin de que esta agua penetre en el suelo y llegue a los acuíferos subterráneo, donde por gravedad el agua sale lentamente al río durante la temporada de sequía (noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo). Para tal fin, se requiere una planeación adecuada del uso del suelo en la región, en la que se incluya la disminución en la deforestación para establecer pasturas para ganadería, promoviendo estrategias como los VAC systems que aprovechan embalses al máximo para la producción de alimento para su vez que maximizar la infiltración de agua lluvia en los acuíferos, si son construidos en tierra.

Palabras clave: aprendizaje automático, hidrología, cuenca del río Ariporo.

I. INTRODUCCIÓN

El caudal del río Ariporo, ubicado en la Orinoquia —región oriental de Colombia—, en el departamento del Casanare, está condicionado por las corrientes de aire húmedo que vienen desde el norte del país con un gran contenido de vapor de agua y generan las grandes precipitaciones de la región [1]. La cuenca de este río, determinada como subzona hidrográfica por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), germina a 2.200 m s. n. m., desagua de oriente a occidente y desemboca en el río Meta, a 110 m s. n. m. [1], [2]. La forma de la cuenca es alargada, de unos 265 km a lo largo y 25 km de ancho en promedio, y está dominada por un paisaje llano, con una pendiente de 0,7%. En zonas montañosas, su pendiente alcanza aproximadamente el 15% [2], [3]. (y); $Y = f(x)$

A partir de la revisión de trabajos en los que se utiliza el aprendizaje automático (machine learning), se ha visto que este se emplea para establecer relaciones complejas, a fin de obtener un modelo mediante el cual se pueden definir escenarios óptimos. Los algoritmos de aprendizaje automático se describen como el aprendizaje de una función objetivo ($f(x)$)

que asigna mejor las variables de entrada (x) Importar imagen a una variable de salida [4].

El modelo de predicción más básico y empleado para el análisis es el de regresión lineal, cuyas estimaciones se utilizan para describir los datos y elucidar la correlación de una o más variables independientes y variables. La regresión lineal encuentra el mejor ajuste a través de los puntos, gráficamente, y la línea con mejor adaptación a través de los puntos se conoce como línea de regresión [4].

Los algoritmos de aprendizaje automático desempeñan un papel importante en el análisis predictivo, que utiliza conjuntos de datos históricos actuales y

pasados para descubrir relaciones a partir de ellos y, mediante el uso de esos datos, predecir los sucesos futuros. La regresión lineal, por su parte, es la mejor forma de predicción del tiempo para un conjunto de datos dependientes, porque ya se tienen datos para la regresión lineal. Por el contrario, en un árbol de decisión, debemos proporcionarlos manualmente y esta es su principal desventaja ya que si tiene más características, el árbol de decisión será más complejo y grande. Otra desventaja es que normalmente se sobreajusta ya que crea modelos de alta varianza y complejidad. [4]

Entre los estudios revisados, se encontró uno enfocado en la gestión del recurso hídrico del río Nilo oriental. En este se utilizaron algoritmos genéticos con respecto a la generación de energía hidroeléctrica y el desarrollo

del riego. Se empleó un modelo de optimización hidroeconómica basado en un algoritmo genético para determinar los máximos beneficios para los escenarios de gestión no cooperativa de las infraestructuras hidráulicas en los países ribereños, por una parte, y la gestión cooperativa de los recursos hídricos entre los países ribereños, por otra parte [5].

También se halló otro estudio donde se revisaron las señales climáticas retardadas para predecir el índice de evapotranspiración estandarizado de precipitación (SPEI, por sus siglas en inglés) en la provincia de Khanhhoa (Vietnam). Allí se analizaron los índices de señales climáticas del océano Índico y del océano Pacífico que rodean la zona de estudio, con el fin de seleccionar cinco predictores para el modelo, utilizando para ello una red neuronal artificial. El modelo desarrollado en dicho estudio permite relacionar las variables de entrada y generar una salida que puede beneficiar el desarrollo de políticas a largo plazo para la regulación de los embalses, así como el riego y los esquemas de alternancia de plantas, en el contexto de la amenaza de sequía prolongada, que es común en esta región [6].

Con base en lo encontrado en la revisión de literatura sobre el tema, el estudio que se presenta a continuación se enfocó en generar un modelo que permita visualizar el comportamiento de las variables hidrológicas, de manera que quienes toman decisiones al respecto puedan ver lo que sucede y, a partir de ello, estén en capacidad de plantear estrategias sostenibles de empleo del suelo para la cuenca del río Ariporo, además de esto, el uso de aprendizaje automático para el procesamiento de datos hidrometeorológicos.

II. METODOLOGÍA

La metodología se dividió en tres fases que se describen a continuación.

Fase 1. Diagnóstico hidrológico de la cuenca utilizando ciencia de datos y sensores remotos

Los tramos superiores del río se delimitaron desde el punto de medición de caudal de Paz de Ariporo, código 36015010 del IDEAM, con latitud de 5,90655556 y longitud de -71,90238889 en el sistema de coordenadas WGS 1984.

Para obtener el tamaño de la cuenca, se delimitó el área de la cuenca mediante la herramienta QSWAT PLUS. Esta delimitación surge desde un modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) de alta precisión y resolución de 12,5 metros de la misión Alos Palsar.

También se descargaron datos de nueve estaciones de lluvia cercanas y se analizaron con la herramienta Google Colaboratory.

Fase 2. Elaboración de un modelo matemático utilizando un balance de materia, con el fin de visualizar la dinámica entre la lluvia y los datos de caudal de la estación del (IDEAM)

A partir de los datos históricos de lluvia, se obtuvo la media, con el fin de conocer el comportamiento medio de las nueve estaciones de lluvia que influyen directamente a la cuenca; así mismo, se obtuvieron los datos medios mensuales de caudal.

Para relacionar la información obtenida, se requería un modelo que representara los datos como un balance de materia, de manera que se relacionaran los datos de caudal y de lluvia con los datos de área de la cuenca en unidades de milímetros de lluvia (precipitación), el área de la cuenca en metros cuadrados y el caudal, realizando el ajuste para que el resultado fuera determinado en metros cúbicos por segundo.

Dentro del mismo modelo numérico, se establecieron las reglas del modelo como un balance de materia, donde el caudal se obtiene a partir de los datos sobre la precipitación, los aportes de agua subterránea y las pérdidas por infiltración y evapotranspiración, así:

Importar imagen Importar imagen Importar imagen Importar tabla

$$Q = P - IEVT + AS$$

[.]

en donde:

Q = caudal (m³/s)

P = precipitación (m³/d)

IEVT = infiltración y evapotranspiración (m³/d)

AS = Aportes de agua subterránea (m³/d)

Los aportes de agua subterránea y las pérdidas por infiltración y evapotranspiración son datos desconocidos. Por tal razón, se utilizó el aprendizaje automático como una regresión para obtener los datos faltantes, sujetos a las reglas del modelo como restricciones, y, de esta manera, se obtuvo un modelo calibrado de balance de masa para la cuenca, ya que una de las restricciones fue que los resultados del modelo fueran iguales a los datos reales de la estación IDEAM 36015010.

Una vez obtenido el modelo, se graficaron los resultados para observar la dinámica de las variables hidrológicas.

Fase 3. Recomendación de estrategias de uso de suelo para la cuenca de acuerdo a los resultados obtenidos

El modelo obtenido muestra cómo el aporte de agua subterránea es indispensable en la temporada de sequía, por lo que se concluye que es necesaria la infiltración de agua lluvia en la temporada de excesos (abril, mayo, junio y agosto) para que los acuíferos se recarguen y aporten agua al río durante la temporada de sequía (noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo). En consecuencia, es preciso formular estrategias de uso del suelo en la planeación de la región, puesto que, por un lado, la deforestación para establecer pasturas para ganadería debe controlarse, de manera que el árbol este implícito en los sistemas productivos, y

por otro lado, deben construirse embalses en áreas estratégicas para maximizar la infiltración de agua lluvia en los acuíferos.

III. RESULTADOS

Mediante Google Colaboratory es posible realizar análisis estadísticos de una gran cantidad de datos y visualizar los resultados en gráficas [7]. Los datos existentes sobre la cuenca están desde el año 1996 hasta el año 2019, tiempo en el cual se procesa la información hidrometeorológica de las diez estaciones hidrometeorológicas, nueve de lluvia y una de caudal.

En las figuras 1 y 2 se graficaron todos los datos disponibles, y la ausencia de datos para algunos años en la estación de Caudal se muestra de color morado. Podemos ver que existe un dato extremo en la estación de la Aguada, representada con color rojo en las figuras 1 y 2, asociado a un error de medición, ya que sobrepasa la media. Allí se observan aumentos tanto en lluvia como en caudal en los años durante los cuales se presentó el fenómeno de La Niña, como el 2011 y 2016. De igual manera, en la figura 2, se observa una disminución de las lluvias en todas las estaciones durante los años 2013 y 2014, los cuales representan una época de fuerte sequía, registrada en las noticias de la época, que ocasionó una alta mortandad de fauna.

La diferencia entre las gráficas es que la de la figura 1 muestra todos los datos unidos, mientras que la de la figura 2 presenta los datos de cada estación por separado. Como se puede ver, en la estación de caudal (de color morado en las figuras 1 y 2) faltan datos. Para corregir esto, se utilizó la biblioteca para aprendizaje automático Scikit-learn (también conocida como sklearn), con el fin de rellenar los datos de lluvia faltantes, mediante una regresión con redes neuronales.

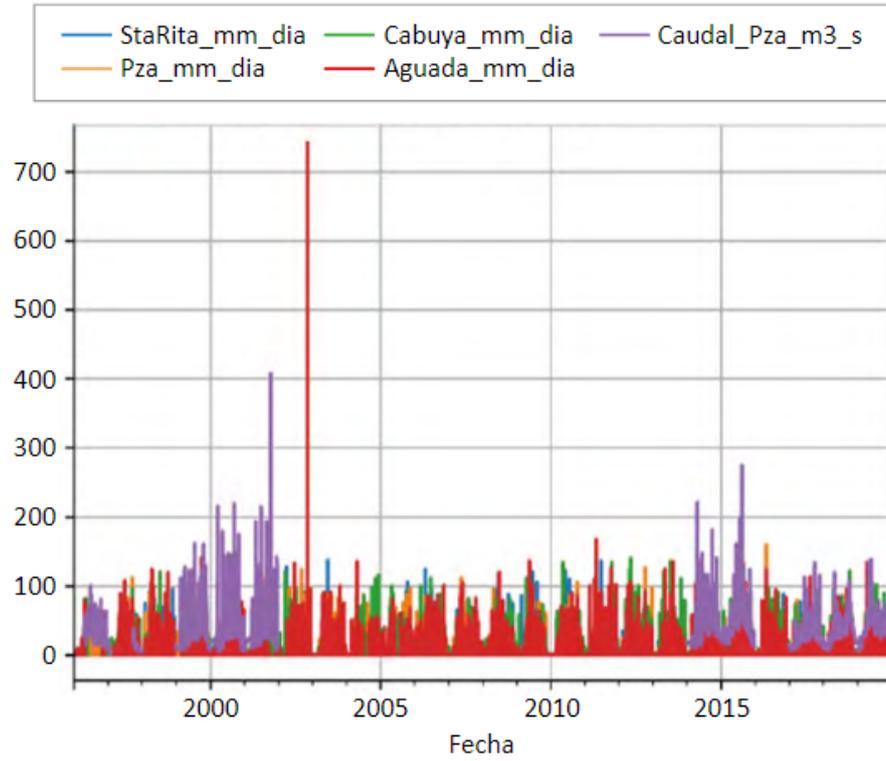


Figura 1
Datos de precipitación diaria en milímetros de las estaciones de la cuenca del río Ariporo.
Elaboración Propia

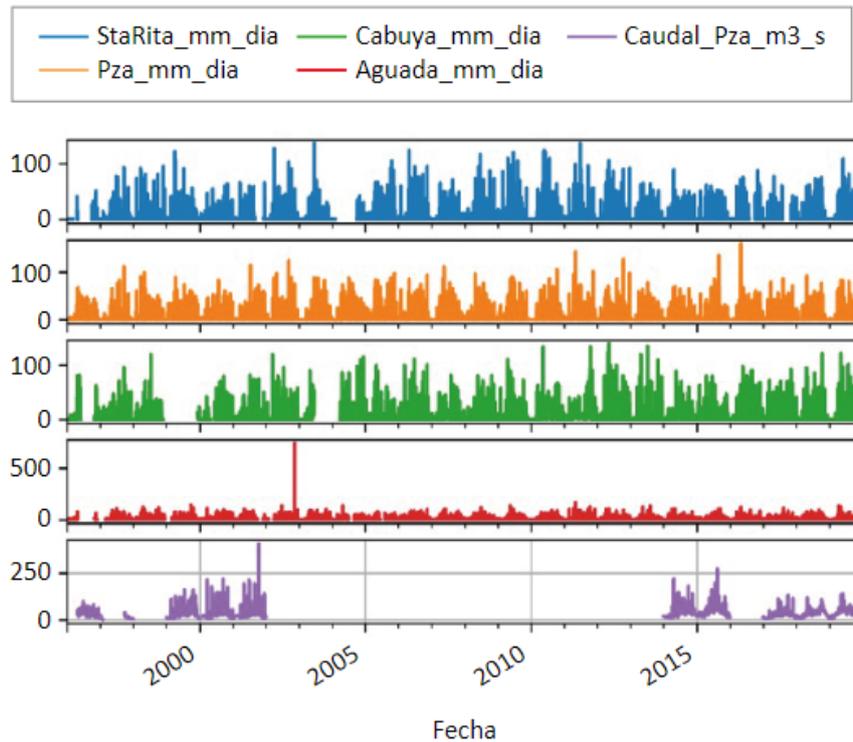


Figura 2

Resultados gráficos de la precipitación diaria en milímetros de las estaciones de la cuenca del Ariporo discriminados por estación.

Elaboración Propia.

Para la observación de los datos, se usó la biblioteca Pandas, donde mediante el comando groupby fue posible agrupar y analizar estadísticamente los datos, a distintas escalas de tiempo. Esto permitió ver el comportamiento diario, mensual y anual para los años comprendidos entre 1996 y 2019, con los datos de precipitación y caudal. En la figura 3 se puede apreciar el comportamiento anual de todas las estaciones de lluvia, entre las cuales, la estación de la Aguada (de color rojo en el gráfico) es la única estación que se acerca a los 3.000 milímetros al año. Así mismo, se puede evidenciar el pico del fenómeno de La Niña, mencionado anteriormente, en el año 2011.

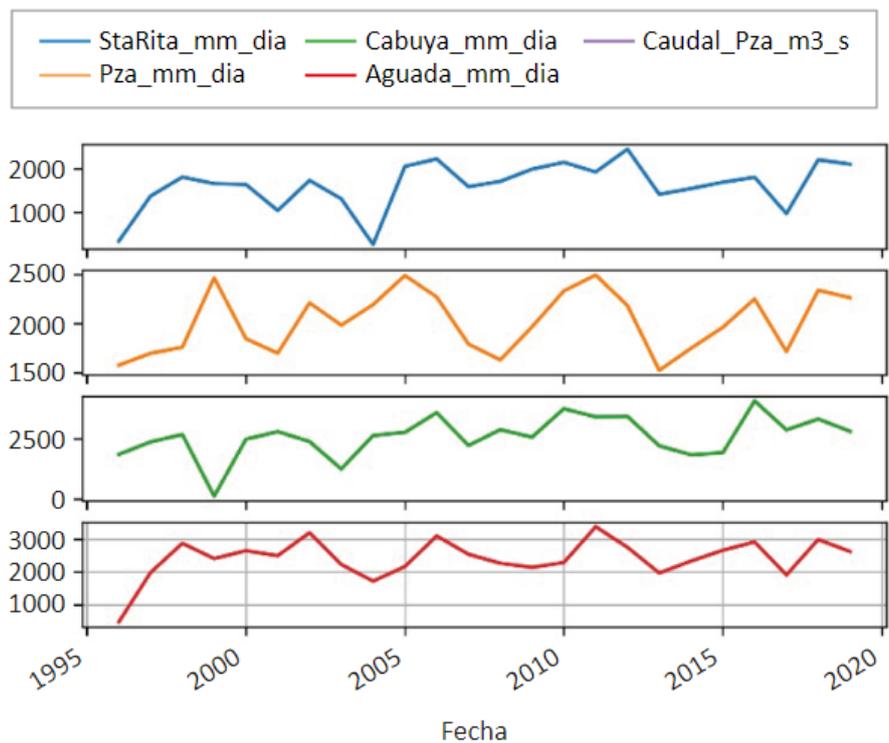


Figura 3.

Resultados gráficos de la precipitación anual en milímetros de las estaciones de la cuenca del río Ariporo discriminados por estación.

Elaboración Propia.

Mediante la biblioteca Sklearn, se importa el perceptrón multicapa (MLP, por su denominación en inglés: multilayer perceptron) de Google Colaboratory. El MLP permite realizar el aprendizaje automático, que consiste en aplicar un modelo de regresión, partiendo de los datos existentes, para entrenamiento y validación. Para el caso de la estación de caudal y los datos faltantes, se realizó una regresión, en la cual se escalaron los datos y se llevó a cabo un entrenamiento con las estaciones de lluvia para rellenar los datos faltantes de caudal, con el fin de obtener la mayor cantidad de datos posibles para el modelo. El resultado de ello se muestra en la figura 4, en donde los datos rellenados con MLP se muestran en color café y los datos de caudal sin rellenar, en color morado.

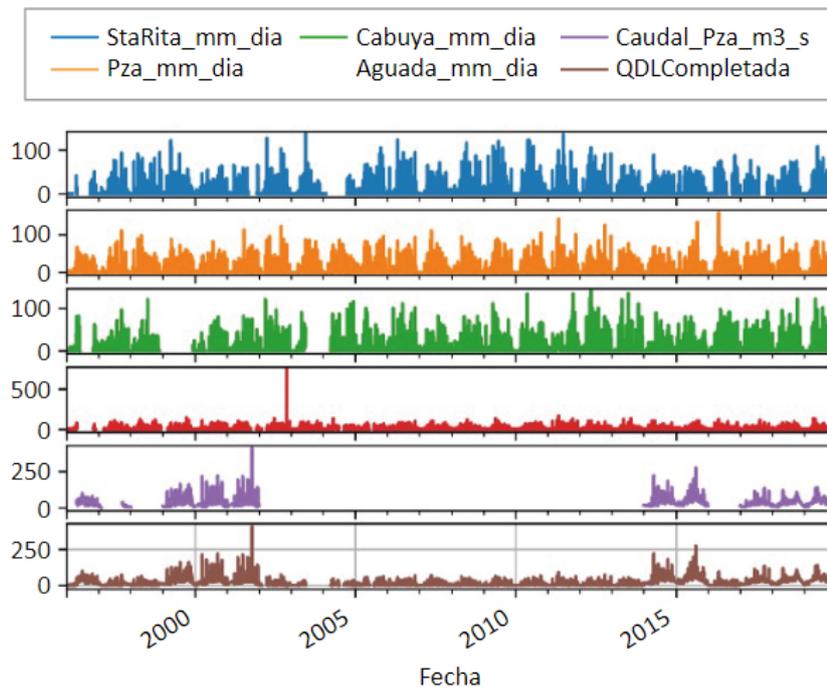


Figura 4.
Rellenado de datos de caudal con redes neuronales.
Elaboración Propia.

Con las cuatro estaciones de lluvia y la de caudal completada, se elaboró un modelo de entrenamiento y validación con MLP, donde se tomó el 80% de los datos (color rojo) y se validó con el 20% restante (color azul); es decir, se realizó un entrenamiento con el 80% de los datos aleatorios completos de las cuatro estaciones de lluvia y una estación de caudal. Con el 20% restante, se validaron los datos para verificar que el modelo fuera correcto. El resultado se muestra en la figura 5. Se determinó que el modelo era eficaz, porque los datos se sometieron al coeficiente de eficacia del modelo de Nash-Sutcliffe (NSE, por sus siglas en inglés) que permite valorar la capacidad de pronóstico de los modelos hidrológicos.

La eficacia de Nash-Sutcliffe se calcula como uno menos el cociente de la varianza del error de la serie temporal modelada dividido por la varianza de la serie temporal observada. En la situación de un modelo perfecto con una varianza de error de estimación igual a cero, la eficacia de Nash-Sutcliffe resultante es igual a 1 ($NSE = 1$). Por el contrario, un modelo que produce una varianza de error de estimación igual a la varianza de la serie temporal observada da como resultado una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0,0 ($NSE = 0$). En realidad, una $NSE = 0$ indica que el modelo tiene la misma capacidad de predicción que la media de la serie temporal en términos de la suma del error al cuadrado.

Para el modelo elaborado, la NSE de los datos de entrenamiento fue de 0,015 y de validación de 0,0144, lo cual es un buen valor para el modelo predictivo, debido a que son valores cercanos, tal como lo muestra la figura 5, en donde el eje x corresponde a la cantidad de datos tomados para entrenamiento, esto es, a un 80% del total de datos; con el 20% restante de datos, se realizó la validación.

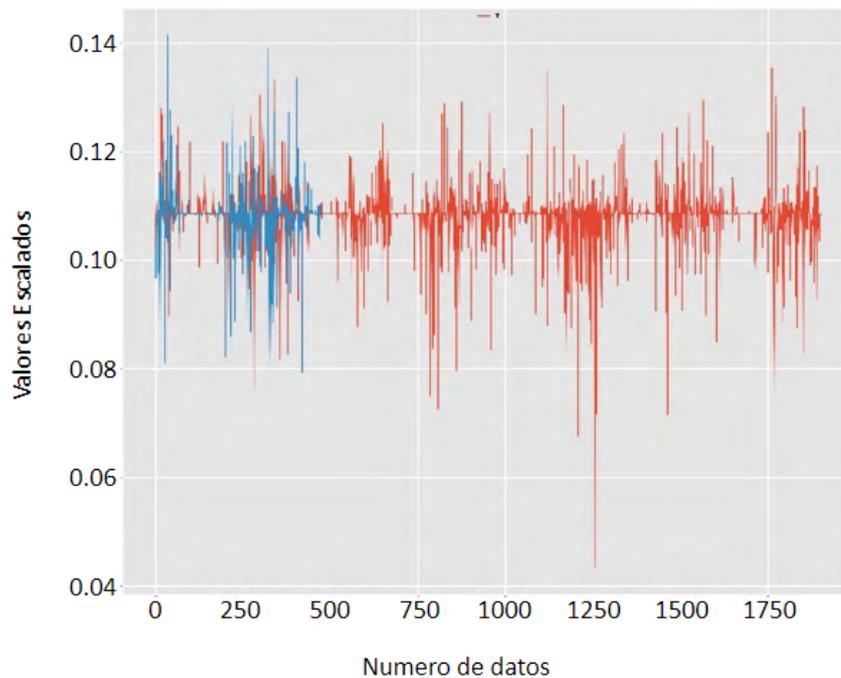


Figura 5.

Resultados del modelo de redes neuronales MLP entre los datos de entrenamiento y validación.

Elaboración Propia.

En la figura 6, se puede observar la correlación entre estaciones, donde 1 es el valor perfecto de correlación entre dos estaciones. Esta gráfica muestra, mediante el método de Pearson, que la mayor correlación se da entre las estaciones que tienen similar altitud o ubicación espacial, y que la diferencia es mayor entre las estaciones que están más alejadas o entre aquellas cuya topografía difiere. Numéricamente, un valor cercano a cero (representado en la gráfica en color azul), significa que no hay correlación; mientras que la similitud en los datos, es decir, que cuando llueve en una llueve en la otra (en el gráfico de correlación de Pearson, el color va desde el blanco al rojo). La correlación más elevada entre dos estaciones de lluvia, se da entre la estación de Paz de Ariporo y la de Santa Rita, ya que presentan el valor más cercano a 1 de todos los resultados (de 0,6). Tal correlación se debe a que estas dos estaciones se encuentran en un área de altura similar y una cerca de la otra, de manera que los vientos y la topografía inciden sobre ellas de manera similar, lo que a su vez produce una distribución similar de las lluvias en el espacio y el tiempo [8].

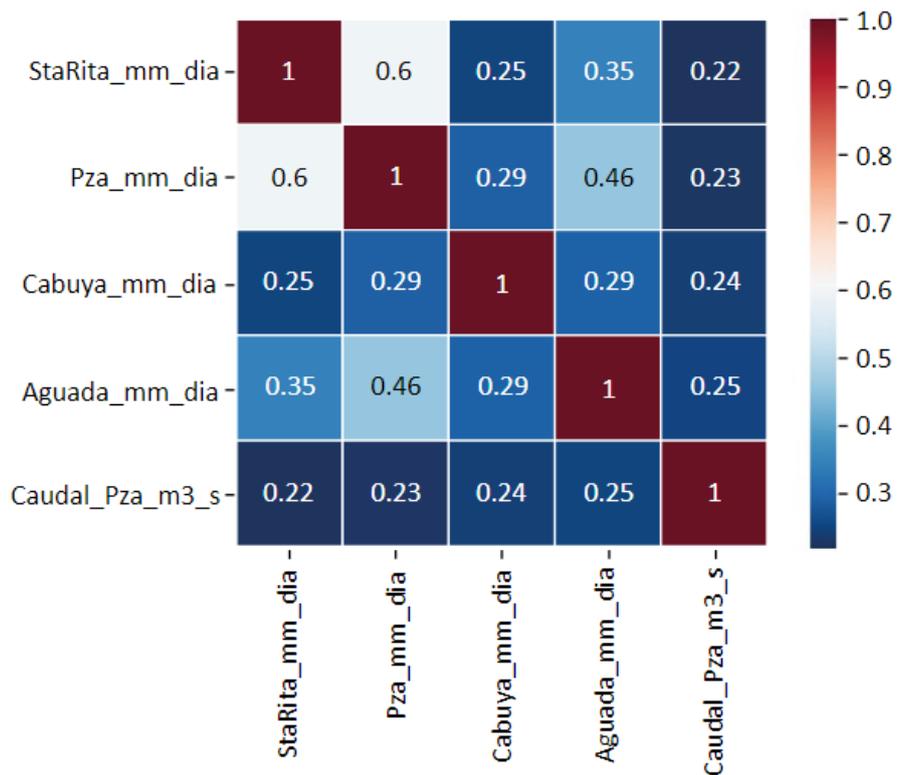


Figura 6

Matriz de correlación entre estaciones por el método de Pearson.

Elaboración Propia.

En la figura 7 podemos observar el producto de la delimitación de la cuenca del río Ariporo, utilizando el sistema de información geográfica QGIS en el punto donde se da la medición de caudales por parte del IDEAM, mediante el complemento Upslope Area del Sistema para Análisis Geocientíficos Automatizados (SAGA). Para utilizarlo, se partió de un piloto de elevación digital, de 12,5 metros de precisión, de la misión Alos Palsar, al cual se le realizó un preprocesamiento para rellenar los espacios vacíos con el complemento Fill Sinks (propuesto por Wang y Liu), en QGIS.

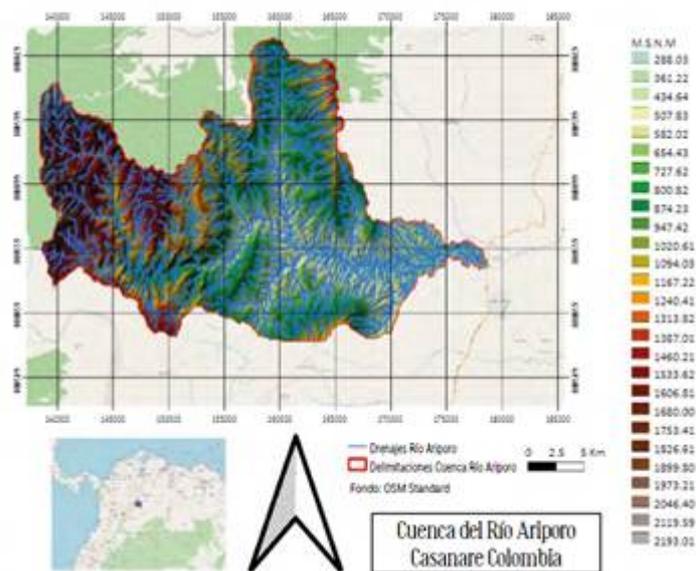


Figura 7.

Representación de la cuenca río Paz de Ariporo, delimitación del área y elevaciones en metros sobre el nivel del mar.

Elaboración propia.

Además de la representación de la cuenca del río Paz de Ariporo, se observa la red de drenaje, es decir, el curso que sigue el agua lluvia al caer.

Por otra parte, utilizando la calculadora de campos de QGIS se determinó que el área de la cuenca es de 487,37 kilómetros cuadrados, dato que se utilizó como insumo para el modelo numérico, teniendo en cuenta el balance de masa como entradas y salidas. En la figura 8 se muestra los resultados del modelo, que representa el promedio mensual de las entradas y salidas del sistema de la cuenca del río Ariporo.

Las entradas a la cuenca corresponden a las lluvias y al aporte de agua subterránea; las salidas de la cuenca, a la infiltración, la transpiración y la evaporación. La relación entre entradas y salidas para cada mes debía ser igual a los datos de caudal. Esa fue la forma de calibrar el modelo, de manera que fueran iguales los valores observados y los valores calculados, a fin de que el modelo pudiera representar lo que sucedía realmente.

La simulación se realizó a partir de los datos medios de todos los años, con base en los cuales se sacó la media de precipitación mensual multianual de todas las estaciones de lluvia. Así, los datos multianuales, el área y los datos de precipitación de la cuenca se usaron para equilibrar la entrada y la salida de esta.

Los datos de lluvia, a su vez, comprometen la información del caudal, como restricción para hallar todos los valores del modelo, tanto de entradas como salidas, involucrando el área de la cuenca dentro del balance de entradas y salidas, de la siguiente manera:

Entradas al sistema: lluvia y agua subterránea.

Salidas del sistema: infiltración y evapotranspiración.

Al establecer el balance con todos los datos, se llegó a los resultados que se presentan a continuación, de manera que se obtuvo un modelo global del funcionamiento de la cuenca con todos los datos existentes, asegurándose con

ello que los datos observados fueran iguales a los datos medidos, de tal manera que el modelo quedara calibrado [9].

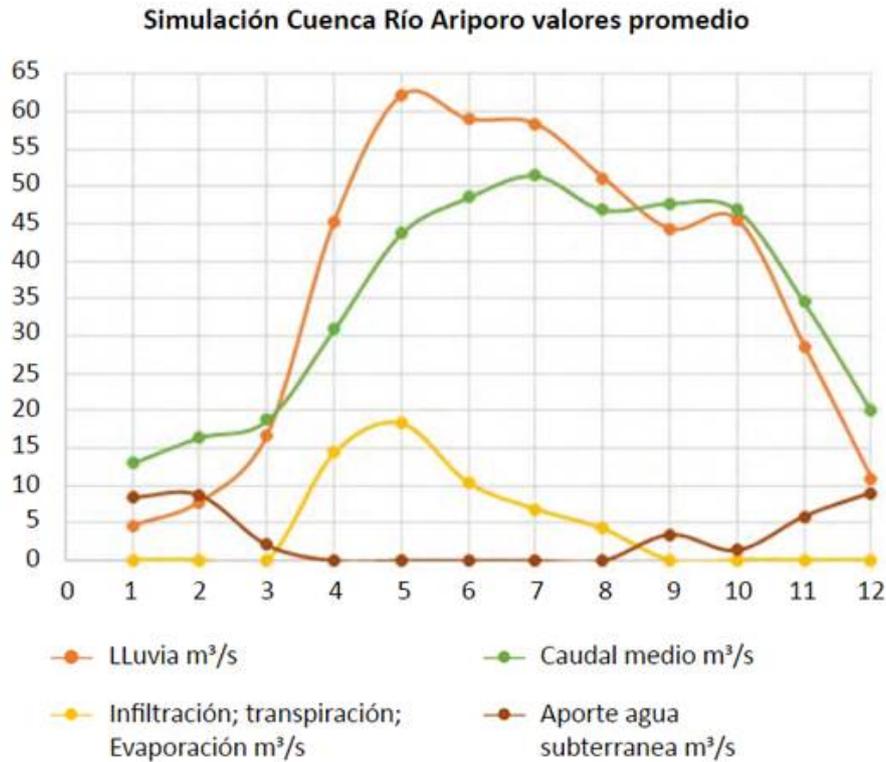


Figura 8.
Resultados del balance de masa de la cuenca del río Ariporo.
Elaboración Propia.

La figura 8 expresa las relaciones entre las entradas y salidas de la cuenca del río Ariporo según el modelo numérico explicado con anterioridad. Se observa que, desde abril hasta agosto, es decir, los meses 4 al 8, son los 4 meses de máxima lluvia, durante los cuales el caudal del río aumenta significativamente. Así, aumentan los datos de infiltración, transpiración y evaporación, lo cual es lógico, puesto que, al aumentar el nivel freático cercano a las raíces, aumenta la acción de las plantas en la transpiración y, así mismo, a medida que llueve, aumenta la infiltración y se recarga el manto freático.

El aporte de agua subterránea no se incrementa, porque en esta temporada no hay un aporte de agua subterránea al caudal, sino una recarga y almacenamiento de agua subterránea, que se asume como resultado de que los acuíferos estén algo más desocupados y en la temporada de lluvia empiecen a llenarse nuevamente.

Por el contrario, durante los meses secos, los datos de lluvia son menores que los datos de caudal, lo cual muestra que el aporte de agua subterránea es vital para que exista el río en esa temporada.

Con base en lo expuesto hasta aquí, se propone realizar como un estudio posterior al presente, mediante sensores remotos, que permita la ubicación de los puntos de mayor infiltración, con el fin de considerarlos como áreas protegidas y cubiertas de bosque nativo, de manera que se maximice la infiltración en la cuenca y se evite la tala en estas áreas para establecer pastos para la ganadería o cultivos de

otras especies vegetales que puedan disminuir la infiltración de agua lluvia, que, como lo muestra la figura 8 es indispensable.

Los resultados obtenidos permitieron observar el comportamiento global de la cuenca alta del río Ariporo, a partir de los datos tanto de lluvia como de caudal.

La conclusión general es que para el río Ariporo es vital la recarga de acuíferos debido a que el río en temporada seca disminuye significativamente, y, el aporte de lluvia es insuficiente para sostener el caudal del río, de manera que, para asegurar que el río se mantenga durante esta temporada, el agua se debe suplir, en gran medida, de la recarga de los mantos freáticos.

En la región existe una gran demanda de agua para riego, pues, para la siembra de arroz, se inunda el terreno. En el Casanare se presenta un alto requerimiento hídrico, de un 48%, y por ello es indispensable el aprovechamiento de los excesos de agua lluvia para la inundación, de manera que se utilice la topografía de precisión. Esto permite optimizar el recurso y evitar al máximo el uso de agua subterránea o del agua del río para tal fin [10].

Así mismo, a partir del presente estudio, se propone analizar, mediante sensores remotos —como los de Google Earth Engine—, la clasificación de uso del suelo, la ubicación de sitios de máxima infiltración y salida de agua subterránea, a fin de hacer un plan piloto de mejoramiento de zonas productivas utilizando sistemas de drenaje al vacío (VAC systems). Estos son sistemas productivos agropecuarios que optimizan el uso de recursos, maximizando la producción de alimentos por unidad de área. Para su implementación es necesario contar con pequeños embalses en áreas de captación pequeñas, de manera que si se realizan en tierra permiten retener el agua en la temporada de exceso, con lo cual se maximiza la infiltración de agua lluvia en la cuenca y, al mismo tiempo, se obtienen producciones grandes de alimentos por unidad de área, sin necesidad de usar agroquímicos. De esta manera, no solo mejoran la economía y la seguridad alimentaria, sino que también se asegura que, a futuro, el río tenga agua en la temporada de estiaje [11], [12], [13] y [14].

IV. CONCLUSIONES

La cuenca del río Ariporo presenta unas condiciones climatológicas típicas de la zona, con largos periodos de lluvia (ocho meses: de abril a noviembre), y cuatro meses secos. Tales condiciones pueden ser definitivas a la hora de establecer las estrategias para la producción y conservación del ecosistema de la región. La cuenca cuenta con numerosas zonas de planicie, que son altamente inundables gracias al predominio de los periodos de lluvia —algunos de estos relacionados con el fenómeno de La Niña—. Dado que estas zonas son potencialmente aprovechables para la producción de arroz, cuyo cultivo requiere la inundación del terreno, es indispensable la toma de decisiones basada en datos para controlar eventos extremos y hacer de ellos una oportunidad de aprovechamiento sostenible para la región.

Actualmente no se cuenta con estaciones limnimétricas en las zonas de planicie inundables, lo que limita el análisis de dichas zonas. Por lo tanto, se requiere una mayor cobertura por parte del IDEAM, que permita obtener datos sobre la región aguas abajo del punto actual de medición, para realizar modelos distribuidos en el espacio y el tiempo con datos de satélite y calibrarlos, con el fin de establecer, a partir de esos datos, modelos que puedan usarse en regiones donde no existen datos del IDEAM.

En la región es necesario establecer políticas de desarrollo para la ordenación del territorio, y específicamente para las actividades ganaderas, arroceras y petroleras, con el fin de estar preparados para un déficit hídrico, como el ocurrido durante el año 2013 y principios del 2014, que causó una tragedia ambiental con gran mortandad de animales en el 2014. El desbalance hídrico de la cuenca debido a la disminución del agua lluvia fue lo que ocasionó dicha tragedia.

Es posible que vuelva a presentarse un déficit de lluvia similar y la región no está preparada en infraestructura ni abastecimiento de agua subterránea de manera sostenible para esa situación. Por lo tanto, es indispensable que quienes toman decisiones al respecto, como alcaldes y gobernadores, cuenten con un modelo del sistema basado en datos, que permita simular escenarios y formular estrategias que tiendan hacia la planeación preventiva de obras y sistemas productivos, así como a la planeación de áreas protegidas y productivas. Las estrategias preventivas siempre serán mejores que las correctivas. Ejemplos de estas últimas son los diques para contener ríos, la perforación de pozos subterráneos para abastecimiento; se trata de soluciones temporales mas no definitivas, cuando lo ideal es plantear políticas preventivas desde la planeación del territorio y hacer de la estrategia preventiva un modo de vida más sostenible para la región

REFERENCIAS

- [1] «Reporte sobre la cuenca del Río Ariporo», Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), Bogotá D. C., Colombia, 2016. [En línea]. Disponible: <http://portal.anla.gov.co/reporte-sobre-cuenca-del-rio-ariporo>
- [2] S. H. Corredor Jiménez, «Revisión y comparación del índice de fragmentación de coberturas naturales para cuatro cuencas hidrográficas en estudio», trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D. C., Colombia, 2019. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/11349/22764>
- [3] «Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua ENA 2018», Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Bogotá D. C., Colombia, nov. 2018.
- [4] A. Sharma y V. Vijayakumar, «Predictive Analytics In Weather Forecasting Using Machine Learning Algorithms», *EAI Endorsed Transactions on Cloud Systems*, vol. 5, n.o 14, pp. 1-4, ene. 2019, doi: 10.4108/eai.7-12-2018.159405.
- [5] R. Digna, M. Castro-Gama, P. van der Zaag, Y. Mohamed, G. Corzo, and S. Uhlenbrook, «Optimal Operation of the Eastern Nile System Using Genetic Algorithm, and Benefits Distribution of Water Resources Development», *Water*, vol. 10, no. 7, p. 921, Jul. 2018, doi: 10.3390/w10070921.
- [6] M. H. Le, G. C. Perez, D. Solomatine, y L. B. Nguyen, «Meteorological Drought Forecasting Based on Climate Signals Using Artificial Neural Network – A Case Study in Khanhhoa Province Vietnam», *Procedia Engineering*, vol. 154, pp. 1169-1169-1175, ene. 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.528.
- [7] J. C. Ramírez Barreto, G. A. Ramírez Feo, y G. A. Forero Buitrago, «Propuesta de almacenamiento de agua lluvia para suministrarla al municipio de Albán utilizando HEC-GeoHMS», *Revista Avances: Investigación en Ingeniería*, vol. 17, n.o 1, pp. 1-1-25, ene. 2020, doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.6031
- [8] E. D. Velásquez García, G. A. Forero Buitrago y G. P. González Angarita, «Simulación hidrológica para sistemas de drenaje sostenible aplicada en jardines verticales en el humedal La Vaca, Bogotá D. C.», *Inventum. Ingeniería*,

- Tecnología e Investigación, vol. 15, n.o 28, pp. 88-103, ene. 2020, doi: 10.26620/uniminuto.inventum.15.28.2020.88-103.
- [9] D. A. Roza Gómez, L. C. Velásquez Osorio y G. A. Forero Buitrago, «Simulación Computacional hidrológica del Río Cali en la escala temporal 2011- 2019». *Revista de Tecnología*, vol. 17, n.o 28, pp. 83-91, 2018. doi: 10.18270/rt.v17i2.3334.
- [10] C. A. Machado (2013). *Ingeniería de la investigación*, 4.a ed. Bogotá, Colombia: Universidad El Bosque, 2013.
- [11] G. A. Forero Buitrago, «Integrated farming system for the foothill-regions of Colombia–Ariporo System (AS)». *Revista de Tecnología*, vol. 12, n.o 2, pp. 24-34, 2013. doi: 10.18270/rt.v12i2.697.
- [12] POMCA, «Formulación del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Ariporo Código 3601: Informe consolidación y estructuración del documento Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuenca Hidrográfica», Corporación Autónoma Regional de la Orinoquía, Colombia, 2015.
- [13] D. A. Romero Rubiano. «Aprovechamiento de aguas superficiales para mini-distrto de riego en la vereda «Labrancitas», en Paz de Ariporo, Casanare», trabajo de grado, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, 2017. [En línea].
- [14] C. D. Guerrero, D. Herrera-Rodríguez, y G. A. Forero Buitrago, «Hidrología e hidráulica computacional aplicada al suministro de agua lluvia de la vereda el Tunal en Paipa, Boyacá Colombia», *inycomp*, vol. 23, n.º 2, p. e2019502, jul. 2021. doi: 10.25100/ iyc.v23i2.9502