

Propuesta sostenible para la mitigación del riesgo de inundación en la cuenca alta del Río Combeima Municipio de Ibagué, Tolima

Sustainable proposal for flood risk mitigation in the upper Combeima river basin, Municipality of Ibagué, Tolima.

Juan Sebastián Leal Cárdenas¹, Martha Liseth Triana Pulido² Gustavo Forero Buitrago³

¹Universidad El Bosque, Bogotá D.C, Colombia, jsleal@unbosque.edu.co

²Universidad El Bosque, Bogotá D.C, Colombia, ml triana@unbosque.edu.co,

³ <https://orcid.org/0000-0002-9739-4741>, University of Iowa, Civil and environmental engineering departamento IHR, AHWA Laboratory Advance Hydrology and Warning applications, gonzaloalberto-forerobuitrago@uiowa.edu



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.8961>

Cómo citar: Leal Cárdenas, J. S., Triana Pulido, M. L., & Forero Buitrago, G. A. (2023). Propuesta sostenible para la mitigación del riesgo de inundación en la cuenca alta del río Combeima, municipio de Ibagué, Tolima. *Avances investigación en ingeniería*, 20(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.8961>.

Resumen

En las últimas décadas se ha presenciado cómo distintos fenómenos y amenazas de variabilidad climática han aumentado frecuentemente en el país, pues el incremento de las precipitaciones y la presencia de largas temporadas invernales, producen efectos negativos sobre los sistemas hidrológicos y generan un alto nivel de vulnerabilidad en las poblaciones. Así las cosas, la presente investigación tiene como objetivo plantear una propuesta sostenible para el control del riesgo por eventos de inundación a través del desarrollo de una metodología basada en la implementación de Sistemas de Información Geográfica, lenguaje python y WEAP en la cuenca alta del río Combeima, municipio de Ibagué, Tolima. Estas herramientas computacionales permitieron realizar un diagnóstico detallado de la zona de estudio y un procesamiento de datos de las series hidrometeorológicas reportadas por once estaciones del IDEAM. Así mismo, por medio del desarrollo del modelo hidrológico en WEAP se analizó el comportamiento histórico de la cuenca, lo que permitió determinar que, según las características y particularidades de la zona, la implementación de embalses y el diseño en línea clave para la reforestación con árboles maderables y cultivos de arroz, son las soluciones basadas en la naturaleza más pertinentes para reducir el riesgo de inundación en la cuenca alta del río Combeima, donde los embalses están diseñados para almacenar aproximadamente 428.660 m³ de agua y el diseño en línea clave para la reforestación permitirá plantar más de 2.100 especies entre frailejones y árboles maderables.

Palabras clave: Inundación, vulnerabilidad, series hidrometeorológicas, propuesta sostenible.

Abstract

In recent decades, different phenomena and threats of climate variability have increased frequently in the country, since the increase in precipitation and the presence of long winter seasons produce negative effects on hydrological systems and generate a high level of vulnerability in populations.

Thus, the objective of this research is to propose a sustainable proposal for flood risk control through the development of a methodology based on the implementation of Geographic Information Systems, Python language and WEAP in the upper Combeima river basin, municipality of Ibagué, Tolima. These computational tools allowed a detailed diagnosis of the study area and data processing of the hydrometeorological series reported by eleven IDEAM stations. Likewise, through the development of the hydrological model in WEAP, the historical behavior of the basin was analyzed, which allowed determining

that, according to the characteristics and particularities of the area, the implementation of reservoirs and the key line design for reforestation with timber trees and rice crops, are the most relevant nature-based solutions to reduce the risk of flooding in the upper Combeima river basin. Where the reservoirs are designed to store approximately 428,660 m³ of water and the key line design for reforestation will allow the planting of more than 2,100 species between “frailejones” and timber trees.

Keywords: Flood, vulnerability, hydrometeorological series, sustainable proposal.

I. Introducción

Los eventos de inundación son propensos a ocurrir en todo tipo de ecosistema del mundo, sin importar si existe o no una intervención del ser humano. Este fenómeno natural constituye un serio y creciente desafío para el desarrollo de las poblaciones, pues el fenómeno genera un alto porcentaje de devastación en cuanto a daños económicos, ambientales y sociales, como pérdidas de vidas humanas. Estos siniestros son causados por un aumento anormal del nivel del mar, fuertes deshielos y las precipitaciones excesivas, que últimamente han aumentado en intensidad y frecuencia, debido al cambio climático [7].

En este sentido, la precipitación es un fenómeno meteorológico muy importante en materia del balance hídrico de una cuenca; esto se debe a que es un fenómeno muy inestable que debe ser cuantificado de forma constante por estaciones hidrometeorológicas, con la finalidad de establecer la cantidad, intensidad y duración de dichas precipitaciones, las cuales se relacionan directamente con el comportamiento del caudal de la cuenca, para así tener la capacidad de predecir eventos intensos que pueden generar procesos de inundaciones y pérdida de suelos [4].

Como caso de estudio se seleccionó la cuenca del río Combeima, la cual se encuentra ubicada en el municipio de Ibagué, departamento del Tolima. Este es uno de los cuerpos hídricos más importantes del departamento, debido a que abastece aproximadamente al 80% de la población del municipio de Ibagué [12].

Se caracteriza por presentar escenarios críticos, como la aparición de fenómenos naturales tales como inundaciones, represamientos, deslizamientos y avalanchas, eventos que se relacionan directamente con el régimen hidroclimatológico, las altas pendientes y los constantes procesos de desequilibrio presentes en esta zona.

Estos fenómenos repercuten significativamente en los procesos de degradación de los ecosistemas, que se articulan en el incremento de factores de vulnerabilidad de las poblaciones, y amenazan su infraestructura física como servicios básicos, malla vial, escuelas, cultivos, viviendas y asentamientos [5].

Por estas razones, el presente proyecto investigativo pretende realizar una propuesta sostenible que permita mitigar el riesgo de inundación en la cuenca alta del río Combeima, mediante el diagnóstico de la cuenca realizado por el procesamiento

de series hidrometeorológicas con lenguaje Python en Google Colaboratory y Sistemas de Información Geográficas como QGIS Desktop, el cual es una tecnología que permite la manipulación y el análisis de los datos geográficos en los estudios medioambientales.

Además de esto, se han configurado como herramientas cada vez más útiles para las tareas de planeamiento territorial [14]. De igual manera, el desarrollo del modelo hidrológico de humedad del suelo que simula el proceso lluvia - escorrentía en el software WEAP, permitió analizar el comportamiento histórico de la cuenca del río Combeima, con el fin de establecer cuáles soluciones basadas en la naturaleza son las más pertinentes para reducir el riesgo de eventos de inundación.

II. Objetivos

2.1 General

Plantear una propuesta sostenible para el control del riesgo por eventos de inundación utilizando herramientas computacionales, Sistemas de Información Geográfica, lenguaje Python y WEAP en la cuenca alta del río Combeima, municipio de Ibagué, Tolima.

2.2 Específicos

Diagnosticar la cuenca del río Combeima por medio de la delimitación en el Sistema de Información Geográfica QGIS y el análisis de series hidrometeorológicas con lenguaje Python en Google Colaboratory.

Construir un modelo hidrológico a través del software de simulación WEAP con el propósito de analizar el comportamiento histórico de la cuenca del río Combeima.

Realizar una propuesta sostenible capaz de mitigar los eventos de inundación en la cuenca alta del río Combeima, a través de la información obtenida en el modelo de WEAP y el diagnóstico de la cuenca.

III. Métodos

3.1 Área de estudio

El municipio de Ibagué, capital del departamento del Tolima, se encuentra ubicado en el centro - occidente de Colombia, sobre la Cordillera Central de los Andes entre el Cañón del Combeima y el Valle del Magdalena, con una gran cercanía del Nevado del Tolima, y se encuentra a una altitud de 1.285 msnm.

La cuenca hidrográfica del río Combeima, forma parte del municipio de Ibagué y se ubica en las coordenadas geográficas 04°19'30" y 04°39'57", latitud Norte, y 75°10'11" y 75°23'23", longitud Oeste, entre los 780 y los 5.220 m.s.n.m. La cuenca tiene una extensión aproximada de 27.186 ha, un área de 271 Km² y una longitud de 57.7 km en su cauce principal, desde su origen en el Nevado del Tolima hasta su desembocadura en el río Coello. Se encuentra en la parte centro - occidental del departamento del Tolima sobre el flanco oriental de la cordillera central de los Andes en Colombia y es un ecosistema estratégico que provee alrededor del 80% del agua para el acueducto de la ciudad de Ibagué [2].

3.2 Metodología objetivo específico 1

Para llevar a cabo el diagnóstico de la cuenca del río Combeima, inicialmente se definió como área de estudio la cuenca alta del río Combeima, donde por medio del Sistema de Información Geográfica QGIS Desktop se delimitó el área de la cuenca y sus respectivos drenajes; mediante esta herramienta computacional y el análisis de mapas emitidos por la Alcaldía del municipio de Ibagué, en el Plan de Ordenamiento Territorial, fue posible representar y analizar las características de los tipos texturales de suelo y los aspectos topográficos de la parte alta del cañón del Combeima, estableciendo de esta manera, las posibles zonas para la implementación de las soluciones basadas en la naturaleza.

Posteriormente, se implementó el Sistema de Información de datos Hidrológicos y Meteorológicos - DHIME, donde se seleccionaron las diferentes estaciones hidrometeorológicas ubicadas en zonas aledañas a la cuenca principal del río; para esto se utilizó el Catálogo Nacional de Estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, y se determinó trabajar con los datos reportados desde el año 1996 al 2021, de 11 estaciones del Área Operativa 10 del IDEAM.

Para el procesamiento de las series hidrológicas fue necesaria la implementación de la herramienta computacional Google Colaboratory, la cual permite ejecutar scripts de Python a través de los servidores de Google; con la aplicación de códigos computacionales se procedió a modelar los diferentes datos hidrometeorológicos reportados por las estaciones, lo que permitió la obtención de resultados gráficos que fueron utilizados con el propósito de analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca alta del río Combeima en materia de variables como precipitación y caudal.

3.3 Metodología objetivo específico 2

Para el desarrollo de este objetivo, inicialmente se ajustaron en el programa Excel los datos de entrada para cada subcuenca; las variables utilizadas corresponden a las de precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad y evapotranspiración.

Luego de ajustados los datos se ingresó al software WEAP para simular el modelo hidrológico de dos tanques que permitió analizar históricamente las variables hidrometeorológicas y otros factores del recurso hídrico. Así mismo, gracias a la aplicación de esta herramienta, se logró emplear objetos y procedimientos a través de una interfaz gráfica que fue implementada para analizar distintos temas e incertidumbres relacionados con el comportamiento climático y las condiciones de la cuenca alta del río Combeima.

3.4 Metodología objetivo específico 3

Luego de obtener el diagnóstico y comportamiento de la cuenca del río Combeima a través de las diferentes gráficas resultantes del modelamiento de datos en Google Colaboratory y el modelo hidrológico obtenido en software WEAP, se procedió a realizar una revisión documental minuciosa con el propósito de verificar cuáles soluciones basadas en la naturaleza eran las más pertinentes para implementar de acuerdo a las características y particularidades de la zona de estudio. Una vez elegidas las estrategias, con ayuda del Sistema de Información Geográfica Google Earth, se desarrolló el diseño de la propuesta sostenible que se ha de implementar en la cuenca hidrográfica, donde se fue posible visualizar la cartografía de la zona, por medio de imágenes satelitales y terrenos en 3D.

IV. Resultados

4.1 Objetivo específico 1

Para llevar a cabo el diagnóstico de la cuenca del río Combeima se utilizó una herramienta de Sistemas de Información Geográfica, conocida como QGIS Desktop, donde se obtuvieron como resultado las figuras 1, 2 y 3, las cuales se muestran a continuación.



Figura 1. Delimitación de la cuenca del río Combeima en Ibagué, Tolima. Fuente: Autores.

En la figura 1 se evidencian de forma clara y precisa determinados puntos geográficos

como el nacimiento del río Combeima en el costado oriental de la cordillera central, exactamente en el Nevado del Tolima, la desembocadura del cuerpo hídrico en el río Coello, río que posteriormente desemboca en el río Magdalena y de igual forma se representa claramente la cuenca principal del río, sus afluentes y drenajes. Asimismo, dentro de la delimitación es fácil identificar cómo la cuenca del río Combeima transcurre dentro de los límites urbanos de Ibagué, lo que se traduce en un riesgo existente por eventos de inundación tanto en la cuenca alta del cañón del Combeima, como en el casco urbano del municipio.

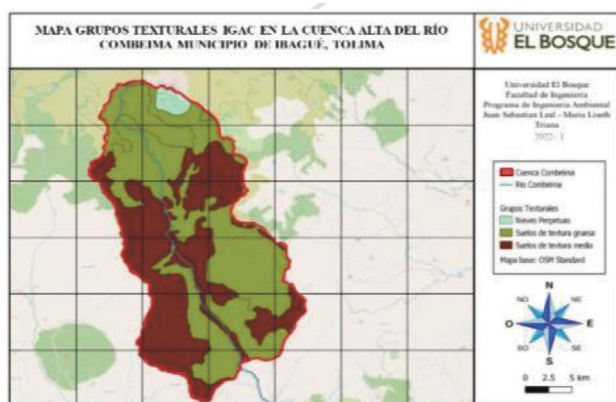


Figura 2. Grupos texturales IGAC de la cuenca alta del río Combeima, municipio de Ibagué, Tolima. Fuente: Autores.

Las clases texturales del suelo, como se observa en la figura 2, determinan la velocidad en el que el agua pueda drenarse por el suelo saturado; estas clases dependen de la cantidad de arena, limo y arcilla que posee el suelo. En el mapa expuesto a continuación se puede observar que la cuenca posee gran parte de suelo arenoso conocido como suelos de textura gruesa, los cuales tienen una mayor capacidad de infiltración del agua, mientras que los suelos arcillosos conocidos como suelos de textura fina, tienen mayor capacidad de retención de agua y aireación en comparación con el arenoso.

Esto se debe a la porosidad del suelo, la cual se representa por el porcentaje de espacios vacíos o poros presentes en él y depende de

la textura, la estructura y la actividad biológica. Por lo que cuanto más gruesos son los elementos de la textura, mayores son los huecos entre ellos, por lo que el agua se infiltra con mayor facilidad [8].

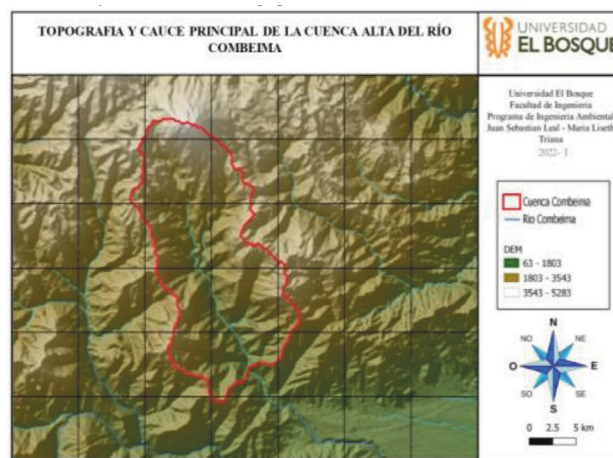


Figura 3. Mapa topográfico de la cuenca del río Combeima. Fuente: Autores.

Por último, en cuanto al mapa de drenajes, pendientes y topografía de la cuenca alta del río Combeima, representado en la figura 3, se evidencia que el cuerpo hídrico cuenta con innumerables cascadas, afluentes y drenajes, en la cual interactúan factores físicos, biológicos y humanos que conforman un megasistema socioecológico. Además, cuenta con una morfología de estrechos valles con fuertes pendientes de hasta 90 grados; asimismo, presenta elevaciones que van desde los 700 hasta los 5.200 m de altitud.

Para analizar el comportamiento de la cuenca del río Combeima, inicialmente fue necesaria la implementación de la herramienta Google Colaboratory, la cual permite ejecutar scripts de Python a través de los servidores de Google. Con la aplicación de códigos computacionales se pudieron modelar los diferentes datos hidrometeorológicos que reportaron las estaciones del IDEAM desde el año 1996 hasta el 2021, donde se logra evidenciar el comportamiento hídrico de la cuenca en materia de parámetros como la precipitación y el caudal.

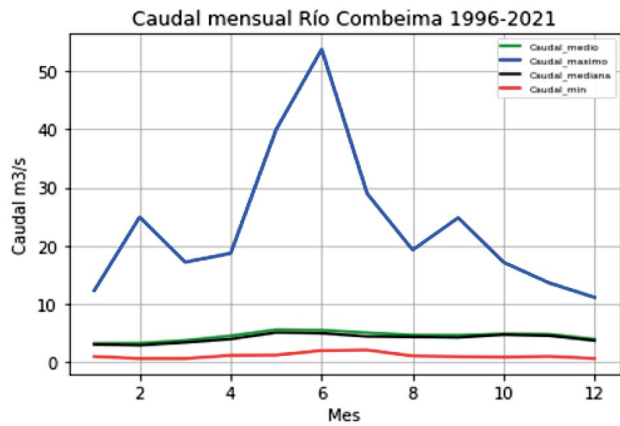


Figura 4. Comportamiento del caudal mensual en la estación Montezuma. Fuente: Autores.

En la figura 4, que corresponde al comportamiento mensual del caudal en la estación hidrológica MONTEZUMA [21217180], se presenta una creciente significativa si se compara el valor medio con el valor máximo del caudal, pues en el segundo cuatrimestre del año el comportamiento promedio del caudal es de 5 m³/s, pero a razón de algunas eventualidades como el incremento de las precipitaciones, el caudal aumenta llegando a valores máximos alarmantes como el de 50 m³/s.

Además del incremento de las precipitaciones, el aumento en el volumen de agua del cauce del río puede deberse a la topografía y grupos texturales particulares con los que cuenta el cañón del Combeima; adicionalmente la presencia de suelos de textura media, en la cuenca alta y media del río, no generan un alto porcentaje de infiltración del agua, por lo que la mayor parte del volumen de agua recae directamente en el caudal principal del río, por procesos de escorrentía.

Como se evidencia en la figura 5, el comportamiento anual del caudal de la cuenca del río demuestra que en temporadas de altas precipitaciones puede incrementar hasta en 40 m³/s, lo cual genera un pico máximo de aproximadamente 53 m³/s entre los años 2009 - 2011, pero en los años restantes el caudal tiende a disminuir, pues se evidencian particularidades que muestran aumento de su magnitud, pero no en valores significativos.

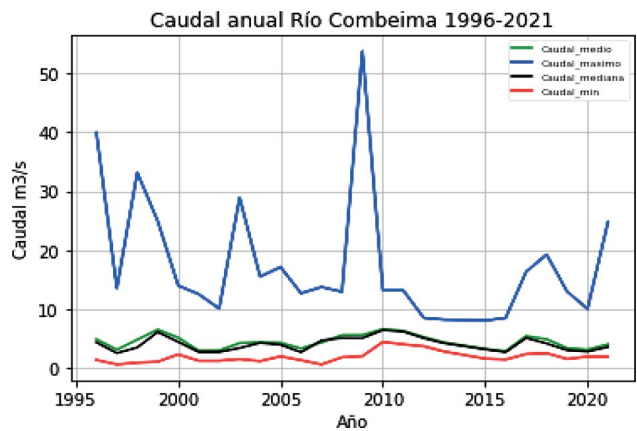


Figura 5. Comportamiento del caudal anual en la estación Montezuma. Fuente: Autores.

Esto puede deberse a que las principales actividades económicas del municipio de Ibagué giran en torno al comercio, la industria, la agricultura, la ganadería y la minería, actividades que conllevan un gran consumo de agua. Y en cuanto a la actividad minera, los elevados niveles de consumo de agua son por una mina de oro ubicada aguas arriba del río Combeima, los cuales consumen de 2 a 3 millones de litros al día, cantidad equivalente al consumo de agua de una familia durante 15 a 20 años.

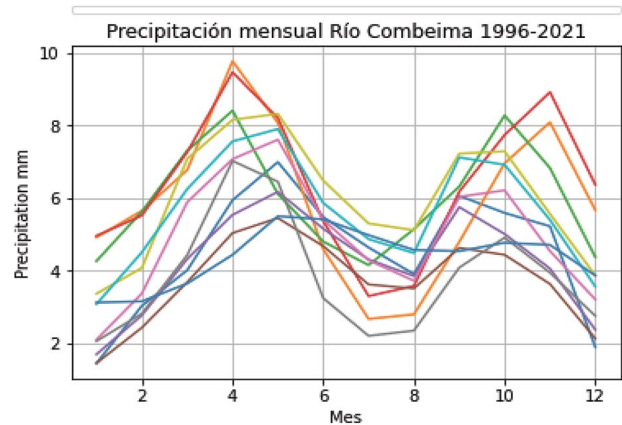


Figura 6. Comportamiento de la precipitación mensual el río Combeima. Fuente: Autores.

La figura 7 corresponde a una gráfica que representa el comportamiento de las series correspondientes a la precipitación anual del río Combeima para cada una de las estaciones hidrometeorológicas utilizadas en el muestreo. En esta se puede observar que para el año 2010, el valor reportado de las precipitaciones

aumentó en la gran mayoría de estaciones, lo cual se debe a que el año 2010 fue catalogado como el año más lluvioso hasta la fecha, esto a razón del fuerte fenómeno de La Niña que se presentó en dicha época.

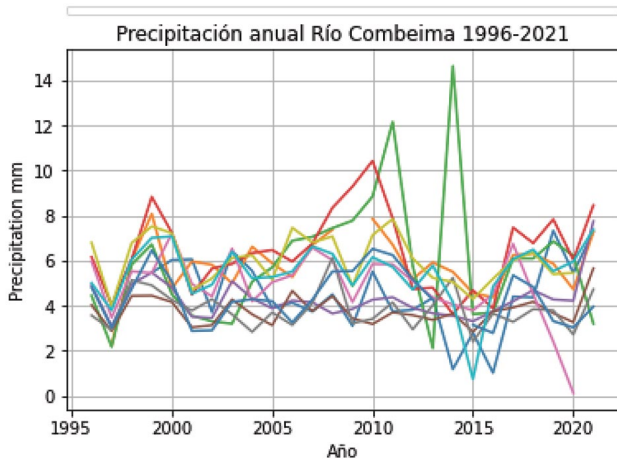


Figura 7. Comportamiento de la precipitación anual del río Combeima. Fuente: Autores.

Asimismo, teniendo en cuenta la información modelada representada en la figura 6, se evidencia el patrón convencional de comportamiento climático de Ibagué, el cual cuenta con dos temporadas lluviosas, las cuales se extienden desde finales de marzo hasta principios julio y desde inicios de septiembre hasta finales de diciembre. Por otra parte, los meses más secos corresponden a julio y agosto.

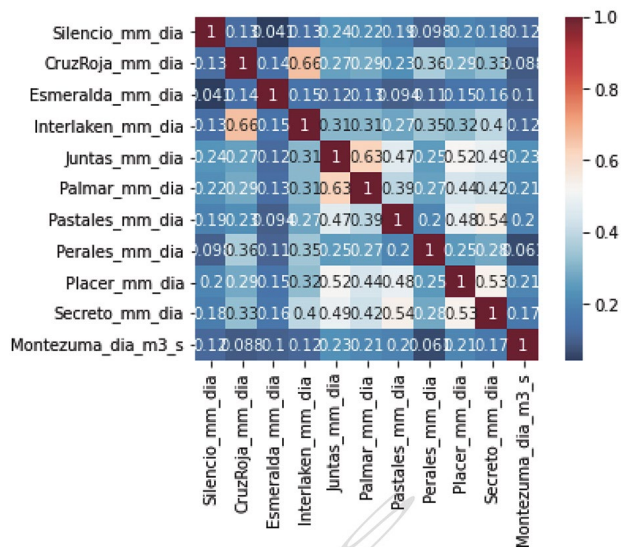


Figura 8. Correlación de los valores de precipitación de las estaciones analizadas en la cuenca del río Combeima. Fuente: Autores.

Por parte de la figura 8 de correlaciones, evidencia la relación de las variables de precipitación obtenidas por el modelamiento de datos de las estaciones; gracias a este diagrama podemos observar que la correlación más alta pertenece a las estaciones INTERLAKEN [21210240] y CRUZ ROJA [21210230], con una magnitud de 0,66 seguida por la correlación de 0,63 entre las estaciones EL PALMAR [21210220] y LAS JUNTAS [21210020]. Estos valores de correlación se deben a que las estaciones se encuentran ubicadas en áreas aledañas, por lo que reportan magnitudes similares. Mientras que la correlación más baja pertenece a las estaciones LA ESMERALDA [21210120] y EL SILENCIO [21210260], con una magnitud de 0,04 debido a que son estaciones con ubicaciones lejanas entre sí, cuentan con distintas particularidades y factores influyentes, por lo que los datos y valores que estas cuantifican son diferentes.

4.2 Objetivo específico 2

Posteriormente se realizó el modelo hidrológico de dos tanques en el software WEAP; esta herramienta fue útil para el análisis histórico de las variables hidrometeorológicas y otros factores del recurso hídrico. Pues las diferentes aplicaciones del WEAP permitieron emplear objetos y procedimientos a través de una interfaz gráfica que fue implementada para analizar distintos temas e incertidumbres relacionados con el comportamiento climático y las condiciones de la cuenca del río Combeima.

El modelo hidrológico que está integrado en el software WEAP utiliza datos espacialmente distribuidos en el área de estudio y se encuentra configurado como una serie de caudales que se relacionan y cubren la totalidad de la extensión de la cuenca del río Combeima. La serie de caudales utilizan valores de datos climáticos descargados del DHIME, el cual es un portal que almacena todos los datos que las estaciones hidrológicas y meteorológicas del IDEAM reportan diariamente. Las variables de entrada en el modelo para cada una de las subcuencas

fueron las de precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad y evapotranspiración.

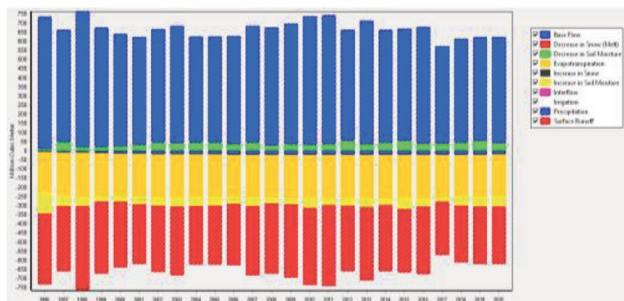


Figura 9. Modelo hidrológico anual de la cuenca del río Combeima en el software WEAP 1996 – 2020. Fuente: Autores.

Esto quiere decir que inicialmente entra la precipitación al tanque superior del modelo, en el cual se encuentra el interflujo que hace referencia al agua subterránea que se localiza a cierta profundidad, exactamente donde están las raíces de las plantas. En el tanque inferior se encuentra el flujo base, el cual también se representa tabulado en la figura 9, donde dicho flujo base multianual de la cuenca del río Combeima, a lo largo de los años cuenta con un comportamiento lineal, con pequeños incrementos en los últimos años, lo cual es importante ya que según Gómez (2016) el flujo base además de ser aportado por los acuíferos subterráneos, son los encargados de mantener el flujo del agua en épocas de verano o sequías. Asimismo, Magdalena (2014) concuerda que las reservas de aguas subterráneas contribuyen al flujo de los ríos cuando no hay precipitaciones, lo que amortigua las variaciones de fenómenos naturales como el de el Niño y la Niña; además, reconoce su importante papel en el ciclo hidrológico, donde su función ambiental se basa en la contribución a manantiales, ríos, lagos, humedales y estuarios.

Por otra parte, Pereyra (2011) determina que la evapotranspiración es la combinación de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación o sea la evaporación biológica. Dentro de esta misma figura 9 se evidencia el comportamiento

multianual de la evapotranspiración en la cuenca del río Combeima, donde se demuestra un comportamiento estable desde el año 1996, sin oscilaciones significativas entre los datos reportados hasta el año 2014, ya que, en años siguientes, hasta el 2020, los valores de evapotranspiración tienden a incrementar levemente, lo cual se debe a los efectos del cambio climático global

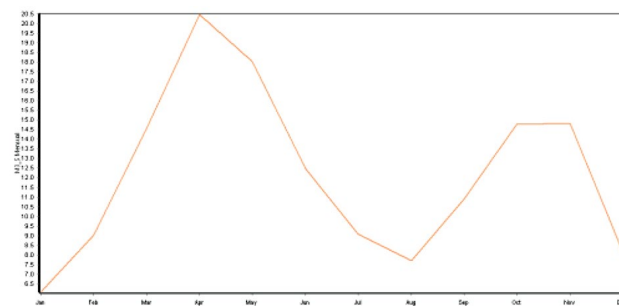


Figura 10. Comportamiento del caudal mensual en la cuenca del río Combeima. Fuente: Autores.

En cuanto al comportamiento del caudal mensual del río representado en la figura 10, se logra apreciar cómo el caudal va aumentando significativamente hasta el mes de abril, donde se encuentra el pico más relevante de la figura; esta tendencia no se mantiene sino que, por el contrario, disminuye progresivamente hasta el mes de agosto cuando se encuentra el valor mínimo y el estiaje del caudal, por lo que se espera que para esta época la cuenca del río Combeima se abastezca o cuente con aportes significativos de aguas subterráneas.

4.3 Objetivo específico 3

Con el propósito mitigar el riesgo por eventos de inundación en la cuenca alta del río Combeima, se desarrolló una propuesta sostenible que consta de dos estrategias enfocadas en las soluciones basadas en la naturaleza (Nature based solutions), las cuales tienen como objetivo abarcar todas las acciones en el marco de los ecosistemas y los servicios que estos proveen, para de esta forma atacar problemáticas socioambientales. Según Guevara (2018) las soluciones

basadas en la naturaleza son capaces de brindar la oportunidad de integrar de forma efectiva las agendas de la acción climática, la conservación de la biodiversidad, la seguridad alimentaria y del agua, la salud humana y la reducción del riesgo de desastres bajo un enfoque coherente y holístico.

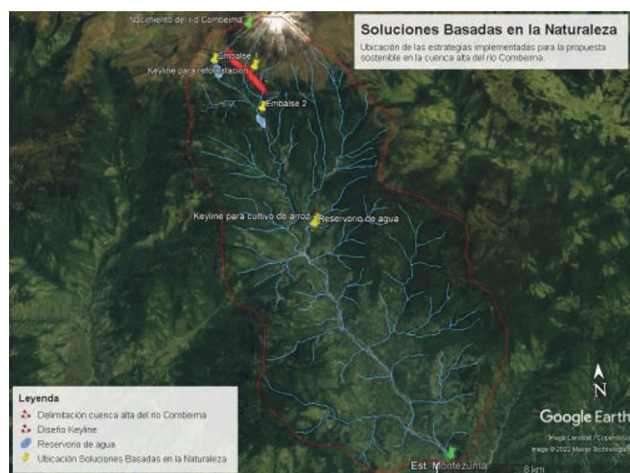


Figura 11. Ubicación de las soluciones basadas en la naturaleza en la cuenca alta del río Combeima. Fuente: Autores.

La figura 11, corresponde al mapa geográfico realizado en la herramienta computacional Google Earth Pro, donde se pueden evidenciar las ubicaciones exactas de las soluciones basadas en la naturaleza implementadas como estrategias de la propuesta sostenible en la cuenca alta del río Combeima. En las que se encuentran los embalses y reservorios de agua para el almacenamiento de agua, y los diseños en línea clave (keyline) para la siembra de frailejones, árboles maderables y cultivos de arroz.

1. Reforestación y siembra de cultivos en Línea Clave (Keyline)

La deforestación es un problema cada vez más marcado en las cuencas hidrográficas; esta tala de árboles reduce la capacidad de conservación de la humedad en la tierra en los diferentes pisos climáticos, lo cual provoca en los suelos una aceleración de la erosión que destruye recursos ecológicos. Es por esto que se quiere realizar una estrategia de reforestación en la cuenca del río Combeima con el fin de proteger y

conservar el ecosistema estratégico que posee el municipio de Ibagué.

Por estas razones, los árboles maderables pueden ser utilizados como una estrategia para disminuir la vulnerabilidad de la zona, donde las medidas de restauración de cobertura forestal en vertientes tienen como objetivo incrementar la protección en calidad y cantidad de las fuentes de agua para consumo humano, apuntando a una mejora de la calidad de vida de la población y el recurso hídrico. Además, como menciona Buitrago (2016) por medio de la reforestación se pueden recuperar especies maderables colombianas, proveer hábitat para especies y enfriar las capas subterráneas cercanas al río. Esto último quiere decir que el agua se mueva a diferencia de temperaturas, del calor al frío, con el fin de recargar el manto freático de la rivera en época lluviosa y almacenar agua para suplir el río en tiempos de sequía.

2. Embalses - Reservorios de agua

Una vez analizado el comportamiento de la cuenca alta del río Combeima se propone como última estrategia el almacenamiento de agua a través de la construcción de embalses en la cuenca alta. El embalse (también conocido como reservorio de agua, represa, jagüey, bordo, dependiendo la región), es un talud de tierra que sirve para almacenar agua en las épocas de lluvia con el fin de tenerla disponible para los tiempos de sequía; es la manera más económica de almacenar volúmenes grandes en los terrenos. Según Gras (2010) los embalses poseen usos potenciales en la parte alta de la cuenca como lo es el almacenaje (sin animales), absorción de nutrientes, hábitat de vida silvestre, disminución de la erosión, transformación del microclima y el control de plagas.

La construcción de estos reservorios nace desde mediados de la década de los 80 y una de sus funciones principales es ayudar en la regulación de crecientes presentes en los cuerpos hídricos, lo que significa que,

en las temporadas húmedas o lluviosas, ingresan a los embalses bastos volúmenes de agua para ser almacenada y posteriormente utilizada en diversas actividades productivas [15].



Figura 12. Embalses de almacenamiento de agua y diseño en línea clave para la siembra de frailejones y árboles maderables. Fuente: Autores.

En cuanto a la figura 12, se logra representar el diseño en línea clave para la reforestación de la zona; la elección de plantar un determinado tipo de planta o de árbol maderable nativo, depende de la altitud a la que se encuentre el diseño, que para este caso específico va desde los 2.800 a 4.000 metros sobre el nivel del mar. Por lo que se propone realizar la siembra de frailejones y árboles maderables como la Palma de Cera quindiuense, Cedro negro Juglans neotropical y árboles de Chocho, las cuales son especies capaces de crecer en estos rangos de altitud.

Pues la Palma de Cera quindiuense crece por encima de los 2.000 msnm, el Cedro negro Juglans neotropical se puede encontrar entre los 1.600 y 3.000 msnm, y por último los árboles de Chocho, los cuales son capaces de crecer en altitudes entre 20 a 3.000 msnm. Así mismo, el diseño en línea clave consta de cinco niveles que tienen una longitud aproximada de 3 kilómetros, teniendo en cuenta que cada árbol necesita aproximadamente entre 5 y 7 metros

para ser sembrado, por lo que se determina que, por cada nivel en el diseño, se plantarán alrededor de 429 especies entre frailejones y árboles maderables, para un total de 2.145 especies sembradas para la reforestación.

Además, en cuanto a las necesidades de la población como el uso de riego, menciona Navarro (2010) que con una buena gestión de los embalses se logra garantizar la calidad y disponibilidad del agua. Por esta razón que los embalses contribuyen de manera positiva a mejorar la calidad de vida humana ya que estos permiten generar condiciones de seguridad a la población localizadas aguas abajo de los embalses, debido a que se reduce o se evita la frecuencia y magnitud de las inundaciones en los predios aledaños a la cuenca.

De esta misma forma, las comunidades se benefician de estos reservorios aprovechando el recurso para abastecerse y en tiempos de sequía ser utilizada para sus actividades económicas. Es por esto que en la figura 12 se evidencia el diseño de los embalses que tienen como objetivo cumplir los fines anteriormente mencionados.

Para el caso del embalse número uno, este cuenta con un área de 182.786 m², un perímetro de 1.854 metros y una profundidad aproximada de 2 metros, por lo que el volumen de agua que logra almacenar es de aproximadamente 183.323 metros cúbicos. Para el embalse número dos, este cuenta con un área de 211.274 m², un perímetro de 2.142 metros y una profundidad de 2 metros, por lo que el volumen de agua que logra almacenar es de aproximadamente 244.702 metros cúbicos.

La figura 13, representa el complemento entre las estrategias del reservorio de agua y el diseño en línea clave para cultivo de arroz, donde el propósito principal se basa en que el diseño en línea clave del cultivo, sea capaz de redirigir el agua que transcurre de la vertiente a la ladera, para

distribuir el agua en todo el terreno y disminuir el porcentaje de agua que por procesos de escorrentía recae en la vertiente o en el cauce principal del río. Esta agua es aprovechada por el suelo y por el cultivo de arroz, el cual es uno de los cultivos que más requiere volúmenes de agua, pero para épocas invernales el agua precipitada sobrante de dicho proceso, es almacenada en el reservorio de agua, para luego ser reutilizada.

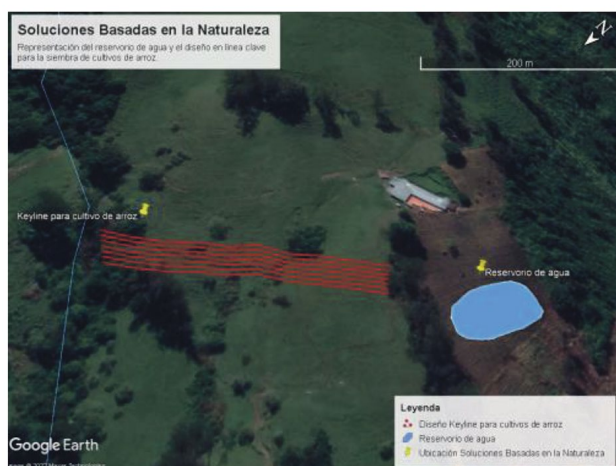


Figura 13. Reservorio de agua y diseño en línea clave para siembra de cultivos de arroz. Fuente: Autores.

El diseño en línea clave para la siembra del cultivo de arroz consta de siete niveles que se separan cada 3 m y tienen una longitud de 175 metros, por lo que el área dispuesta para el cultivo es de aproximadamente 3.675 metros cuadrados, lo que corresponde a 0,37 hectáreas. De igual manera, el reservorio de agua cuenta con un área de 1.011 m², un perímetro de 126 metros y una profundidad de 1,5 metros, por lo que se logra determinar que el reservorio sería capaz de almacenar aproximadamente 635 metros cúbicos de agua.

V. Conclusiones

El alto riesgo por eventos de inundación en la cuenca del río Combeima se debe a que el caudal precipitado, dada la deforestación de las cuencas y el proceso de endurecimiento del suelo, se genera una notoria reducción en los procesos de infiltración por

lo que la gran mayoría del agua precipitada en las intensas lluvias, por medio de escorrentía, ingresa de forma directa al cauce del río Combeima, incrementa sus niveles y su caudal, y supera así la capacidad de transporte de la cuenca, lo que produce el desbordamiento del río.

Por medio del diagnóstico y análisis de la cuenca del río Combeima se determina que la cuenca del río presenta las condiciones climatológicas típicas del municipio de Ibagué, donde se cuenta con un comportamiento bimodal anual de la precipitación, con picos significativos en los períodos de marzo - mayo y agosto - noviembre.

Así mismo, dentro de estos mismos períodos, pero para los años 2009 – 2011, se registraron los valores máximos anuales del caudal en la estación hidrológica Montezuma [21217180], donde el pico máximo fue de 53 m³/s. Esto se debe al incremento paulatino de las precipitaciones causadas por la ola invernal asociada al fenómeno de La Niña que azotó al país en los años 2010 - 2011, la cual, por sus altos niveles de afectación, fue catalogada como uno de los peores desastres naturales del país.

El desarrollo del modelo hidrológico de humedad del suelo que simula el proceso lluvia - escorrentía en el software WEAP, permitió analizar el comportamiento histórico de la cuenca del río Combeima tanto gráfica como numéricamente, con lo cual se logró estimar los flujos superficiales y subterráneos del río, determinando factores que favorecen el equilibrio ambiental de la cuenca, pues en los últimos años el incremento del flujo base así no sea tan significativo, genera servicios ambientales importantes, pues el flujo base, además de ser aportado por los acuíferos subterráneos, es el encargado de mantener el flujo del agua en épocas de verano o sequías, para amortiguar las variaciones de fenómenos naturales como el de el Niño y la Niña.

Gracias a esto, se demuestra que las estrategias preventivas siempre serán mejores que las correctivas, pues si las comunidades de los centros poblados aledaños a la cuenca implementan la construcción de reservorios de agua y el diseño en línea clave para la siembra de cultivos y la

plantación de árboles maderables, disminuirá significativamente la velocidad del agua precipitada y será almacenada y retenida en beneficio del ambiente y podrá ser utilizada en praderas, cultivos y árboles; el resto del agua se puede almacenar en embalses o reservorios.

Referencias bibliográficas

- [1] J. Díaz-Verdejo, "Ejemplo de bibliografía", En Actas de las XI Jornadas de Ingeniería Telemática, vol. 1, n. 1, pp. 1-5, 2013.
- [2] Andrade Castañeda, H. J., Segura Madrigal, M. A., & Sierra Ramírez, E. (2018). Servicios ecosistémicos aportados por sistemas de producción en laderas de la cuenca media del río Combeima (departamento del Tolima, Colombia): Un aporte a la gestión del recurso hídrico. Ibagué: Sello Editorial Universidad del Tolima, 2018.
- [3] Buitrago, G. A. F. (2016). La madera colombiana, oportunidad de regeneración del flujo de los ríos mediante una producción sostenible y competitiva. *Revista de Tecnología*, 15(2).
- [4] Canchanya Melchor, J., Chafloque Gavilán, R. C., Fernández Velásquez, E., Flores Calderón, E. H., Gutiérrez Vivas, B. (2013). Análisis de Precipitación de Una Cuenca. Lima: Editorial Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [5] CONPES. (2009). Estrategias de mitigación del riesgo en la cuenca del río Combeima para garantizar el abastecimiento de agua en la ciudad de
- [6] Gómez - Isidro, S., & Gómez - Ríos, V. L. (2016). Análisis de flujo base usando curvas maestras de recesión y algoritmos numéricos en cuencas de montaña: Cuenca del río Suratá y cuenca del Río de Oro (Santander, Colombia). *Dyna*, 83(196), 213-222.
- [7] González, J. P., & Jurado, M. C. (2014). Evaluación de la utilidad de estimaciones satelitales de precipitación para la modelación de inundaciones en sistemas de la alerta temprana de cuencas de relieve complejo: Caso de estudio en la cuenca del río Bogotá (Tesis de pregrado). Universidad El Bosque, Bogotá D.C.
- [8] González - Barrios, J. L., González - Cervantes, G., & Chávez - Ramírez, E. (2012). Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenca alta del río Nazas. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(1), 21-32.
- [9] Gras, E. (2010). Cosecha de agua y tierra (No. 333.79/G767). Carmina Editores.
- [10] Guevara, O., Rodríguez, A. V., van Breda, A., Ilieva, L., Cordero, D., Podvin, K., ... & McQuistan, C. (2018). Adoptando soluciones basadas en la naturaleza para la reducción del riesgo de inundación en América Latina.
- [11] Narváez, L., Lavell, A., & Pérez, G. (2009). La gestión del riesgo de desastres. Secretaría General de la Comunidad Andina.
- [12] Rodríguez, J. M. V. (2010). La cuenca del río Combeima y el abastecimiento de agua en Ibagué amenazadas por la megaminería.
- [13] Pereyra Díaz, D., Cruz Torres, D. G., & Pérez Sesma, J. A. A. (2011). La Evapotranspiración Real (ETR) en la cuenca del río La Antigua, Veracruz: estado actual y ante escenarios de cambio climático. *Investigaciones geográficas*, (75), 37-50.
- [14] Piñeiro, F. J. G. (2018). Los sistemas de información geográfica: su importancia y su utilidad en los estudios medioambientales. *Vasconia. Cuadernos de Historia - Geografía*, (20).
- [15] San Miguel, S. E., Alvez, C. E., & Zamanillo, E. A. (2006). Modelo de simulación de embalses para análisis de riesgo. In VIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación
- [16] Sedano, K., Carbajal, J., & Ávila, A. (2013). ANÁLISIS DE ASPECTOS QUE INCREMENTAN EL RIESGO DE INUNDACIONES EN COLOMBIA.
- [17] Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 – A demand-, Priority-, and Preference- Driven Water Panning Model. *Water International*, 30(4), 487-500.
- [18] Zubieta, R., Laqui, W., & Lavado, W. (2018). Modelación hidrológica de la Cuenca del río Llave a partir de datos de precipitación observada y de satélite, período 2011 - 2015, Puno, Perú. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(5), 85-105.