



Estimación del índice de uso de agua en la microcuenca de la quebrada La Sultana ubicada en el municipio de Caldas, Antioquia perteneciente a la empresa Cipreses de Colombia S.A.

Autor

Estefanía García Acevedo

Informe de práctica como requisito para optar por el título de:

Ingeniera Sanitaria

Asesor

Camilo Andrés Valderrama Benítez

Ingeniero Sanitario

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, escuela ambiental

Ingeniería Sanitaria

Medellín

2023

Cita	(García Acevedo, 2023)
Referencia	García Acevedo, E. (2023). <i>Estimación del índice de uso de agua en la microcuenca de la quebrada La Sultana ubicada en el municipio de Caldas, Antioquia perteneciente a la empresa Cipreses de Colombia S.A.</i> [Semestre de industria]. Universidad de Antioquia, Medellín.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1 Objetivos	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2 Marco teórico	13
3 Metodología	16
3.1 Revisión bibliográfica	16
3.2 Área de estudio	16
3.3 Oferta hídrica	18
3.3.1 Precipitación	19
3.3.2 Evapotranspiración potencial	20
3.3.3 Evapotranspiración real	21
3.4 Demanda hídrica	22
3.5 Índice de uso de agua	22
4 Resultados	23
4.1 Resultado oferta hídrica	23
4.2 Resultados demanda hídrica	26
4.3 Índice de uso de agua	27
5 Análisis	28
5.1 Análisis oferta hídrica	28
5.2 Análisis demanda hídrica	28
5.3 Análisis IUA	29

6 Conclusiones	30
Referencias	32
Anexos	35

Lista de tablas

Tabla 1 Rangos y categorías del Índice de Uso del Agua (IUA)	16
Tabla 2 Precipitación mensual para la microcuenca de la quebrada La Sultana.....	23
Tabla 3 Temperatura media para la microcuenca de la quebrada La Sultana	24
Tabla 4 Evapotranspiración potencial mensual para la microcuenca de la quebrada La Sultana .	24
Tabla 5 Evapotranspiración real mensual para la microcuenca de la quebrada La Sultana.....	24
Tabla 6 Caudal mensual para la microcuenca de la quebrada La Sultana	25
Tabla 7 Caudal ambiental y oferta hídrica mensual para la microcuenca de la quebrada La Sultana.....	26
Tabla 8 Demanda hídrica mensual y anual para la microcuenca de la quebrada La Sultana.....	26
Tabla 9 Índice de uso de agua mensual y anual para la microcuenca de la quebrada La Sultana	27

Lista de figuras

Figura 1 Microcuenca quebrada La Sultana, Caldas.	17
--	----

Siglas, acrónimos y abreviaturas

Corantioquia	Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia
DEM	Modelo de Elevación Digital (Digital Elevation Model)
ENA	Estudio Nacional del Agua
ETP	Evapotranspiración Potencial
ETR	Evapotranspiración Real
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IRH	Índice de Retención Hídrica
IUA	Índice de Uso de Agua
POMCA	Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas
Qamb	Caudal Ambiental

Resumen

En el presente trabajo, se elaboró el cálculo del Índice de Uso de Agua (IUA) de la microcuenca de la quebrada La Sultana ubicada en el municipio de Caldas, Antioquia la cual nace en los predios de la empresa Cipreses de Colombia S.A. Debido a lo anterior, se planteó identificar la presión que se está ejerciendo sobre el recurso hídrico como consecuencia del uso doméstico que se está dando en el sitio, estableciendo el Índice del Uso del Agua (IUA). El desarrollo del cálculo se realizó tomando como base la metodología brindada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), donde a partir de la relación entre la demanda (obtenida en función de la concesión de agua otorgada por la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia) para el acueducto veredal de la zona) y la oferta (realizada con datos de precipitación, evapotranspiración, área de la microcuenca y caudal ambiental) se logró calcular el índice, que, a partir de su valor se logró interpretar su significado sujetos a una categoría ya dispuesta. Los resultados obtenidos teniendo en cuenta sólo la demanda doméstica fue favorable, ya que, para todos los meses se tuvo un resultado dentro del rango de 1 a 10, por lo que se estableció para todo el año 2022 que la presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible.

Palabras clave: recurso hídrico, demanda hídrica, índice de uso de agua, evapotranspiración, caudal ambiental, índice de retención hídrica, microcuenca.

Abstract

In this work, the calculation of the Water Use Index (IUA) of the micro basin of the La Sultana stream located in the municipality of Caldas, Antioquia, which belongs to the company Cipreses de Colombia S.A Due to the above, it was proposed to identify the pressure that is being exerted on the water resource as a result of the domestic use that is taking place at the site, establishing the Water Use Index (IUA). The development of the calculation was based on the methodology provided by the Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), where, based on the relationship between demand (obtained from the water concession granted by the Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia) for the local aqueduct of the área) and offer (based on precipitation, evapotranspiration, micro basin area and environmental flow data) the index was calculated and, based on its value, its meaning was interpreted subject to an already established category. The results obtained taking into account only the domestic demand was favorable, since, for all the months there was a result within the range of 1 to 10, so it was established for the whole year 2022 that the demand pressure is low with respect to the available supply.

Keywords: water resource, water demand, water use index, evapotranspiration, environmental flow, water retention index, micro basin.

Introducción

Durante milenios, las civilizaciones se desarrollaron en entornos con escasez de agua, pero la escasez no era tan grave como la conocemos hoy. Los conocimientos culturales relevantes, en particular para el uso del agua, constituyen un patrimonio esencial de la humanidad, ya que con estos se puede realizar un progreso colectivo. Sin embargo, los avances del siglo XX han desafiado las habilidades tradicionales, que a menudo son reemplazadas por tecnologías y manejos importados de diferentes ambientes y culturas (Pereira et al., 2012). Como lo es el acceso continuo y sostenible de agua potable, el cual sigue siendo un gran desafío para millones de personas en el mundo. Este problema se ve agravado en las zonas rurales de la mayoría de los países en desarrollo debido a la falta de infraestructura de abastecimiento o al suministro inadecuado de agua potable (Olasoji et al., 2019).

Por otro lado, el contraste entre el nivel de consumo mínimo y la cantidad de agua disponible en el planeta es de preocupación mundial y hace que las organizaciones mundiales promuevan que los países se comprometan con estos dos indicadores para ejercer mecanismos de orden jurídico para la conservación de los ecosistemas, el equilibrio en el acceso per cápita al recurso hídrico, entre otros (Sutorius & Rodríguez, 2015).

En las zonas de aguas arriba y aguas abajo, de las cuencas hidrográficas forestales se proporcionan una gran cantidad del agua que se destina a usos domésticos, agrícolas, industriales y ecológicos. Los administradores de la tierra, los bosques y el agua enfrentan un desafío significativo para maximizar los servicios multisectoriales proporcionados por los bosques sin comprometer las funciones de los ecosistemas. Se debe comprender las interacciones entre los bosques, árboles y agua para tener material de hidrología forestal y crear las políticas del sector (Calder et al., 2007).

Un parámetro que permite comprender la disponibilidad del recurso agua en correlación con su demanda es el Índice de Uso de Agua (IUA), antes conocido como índice de escasez, en la actualidad se monitorea con mayor frecuencia para mantener actualizada la condición que vive cada país en cuanto a la disponibilidad y factores que afectan el agua. Colombia se encuentra clasificada en dicha categoría por sus grandes fuentes hídricas y disponibilidad del recurso apto para uso y consumo humano (Díaz, 2019).

En el país se ha intentado regular el uso del agua, creando una serie de normas dispersas, poco sustentables, desconectadas de la complejidad de integridad de los ecosistemas y de la importancia del recurso hídrico. Así, se encuentra una división teórica que nace de la existencia de diversas regulaciones en donde una cosa es el derecho de aguas y otra es el derecho al agua (Sutorius & Rodríguez, 2015).

Si bien la industria forestal destina gran cantidad del agua para sus labores económicas, en este proyecto no se pretende encontrar la influencia del uso de esta dentro de las microcuencas de estudio, sino, en este caso, solo realizar las relaciones oferta-demanda teniendo en cuenta el uso doméstico dentro de la microcuenca analizada.

En este sentido, la empresa Cipreses de Colombia S.A, comprendida por cuatro núcleos forestales (Yarumal, Yolombó, Caldas y Prado del departamento de Antioquia), centra sus operaciones allí en la plantación, cuidado y cosecha de 5 diferentes especies de pino. Para esto utilizan el recurso hídrico que se encuentra dentro de sus predios del cual hacen uso las comunidades aledañas por medio de acueductos veredales y contratistas que se quedan en los campamentos que dispone la empresa para ellos (Cipreses de Colombia S.A, comunicación personal, 07 de julio de 2022)

Como consecuencia de esto, se hace primordial para la empresa establecer y conocer el IUA en relación a los intereses y las actividades que se generan en este sector buscando siempre un desarrollo ambientalmente sostenible, iniciando como plan piloto el núcleo del municipio de Caldas, ejecutándolo en una microcuenca de este, utilizando la relación entre la demanda y la oferta para obtener un porcentaje que le permita establecer unos rangos ya establecidos, para así finalmente obtener la presión que se está ejerciendo sobre el recurso hídrico en la zona de estudio.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Determinar a partir del Índice de Uso de Agua (IUA) la cantidad de agua para uso doméstico dentro de la unidad de manejo forestal de la microcuenca de la quebrada La Sultana ubicadas en el municipio de Caldas, Antioquia perteneciente a la empresa Cipreses de Colombia S.A

1.2 Objetivos específicos

- Realizar un rastreo documental sobre la información disponible de la microcuenca de la quebrada La Sultana ubicada en el núcleo de Caldas.
- Cuantificar la oferta y demanda hídrica de la microcuenca de estudio.
- Interpretar los resultados del IUA en la microcuenca de interés evaluándolo a través de la metodología propuesta por el IDEAM.

2 Marco teórico

Uno de los principales factores que afectan los recursos hídricos de un país es el crecimiento poblacional y a la presión poblacional sobre el recurso, a esto se le adiciona la demanda agrícola e industrial. Esta presión tiene consecuencias adversas que se revierten a la sociedad que demanda el agua, ya que al crecer la demanda aumentan los vertimientos de aguas residuales que impactan la calidad del recurso hídrico, induciendo la escasez de agua, no por disponibilidad de esta, sino por calidad inadecuada para el consumo humano y otras actividades (Domínguez et al., 2008).

Diferentes estudios sobre la disponibilidad del recurso hídrico se han realizado alrededor de Colombia, por ejemplo, en Tolima, de acuerdo con el trabajo de Gutiérrez et al, (2015), en la cuenca del Río Opía, aplicaron la metodología expuesta en la resolución 865 del 2004 por el Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial, en la cual relacionaron la oferta y demanda neta del agua, considerando dos escenarios, el primero donde hay información disponible de demanda hídrica con respecto a las concesiones, y el segundo cuando no se tiene la información por lo cual lo realizaron con métodos indirectos utilizando la cartografía de cobertura de suelos, datos de precipitación, Evapotranspiración Potencial (ETP) y coeficientes teóricos según la cobertura. Del desarrollo del trabajo obtuvieron que el índice de escasez para el río Opía es muy alto debido principalmente a la gran demanda del recurso en el sector agrícola, seguido del pecuario y por último del doméstico.

Otro caso de estudio se desarrolló en el Departamento del Magdalena, en el cual Delgado & Quintana, (2014) determinaron el índice de escasez de la cuenca del río Guachaca, mediante el análisis de la escorrentía superficial y la demanda de agua generada por los usos del suelo, de acuerdo con la metodología propuesta por el IDEAM, para el desarrollo del trabajo se obtuvieron las características morfométricas de la cuenca relacionadas con la forma, el relieve y la Hidrografía de las 57 subcuencas en que se dividió la zona. Determinaron la demanda de agua basándose en la población actual y futura en las subcuencas, y los diferentes usos del suelo y cultivos presentes en la misma y también se calculó la oferta hídrica dentro de la cuenca, de la cual concluyeron que se requiere un mayor control sobre los cultivos permanentes estableciendo algunas zonas de protección en la parte baja de la cuenca.

Algo en común de los estudios desarrollados en Colombia sobre estimaciones de oferta y demanda hídrica es la falta de información, ya que hay pocas estaciones climatológicas y

meteorológicas y la aplicación de modelos que estiman esta oferta hídrica empleando información escasa resulta muy interesante e importante para elaborar planes de manejo de las cuencas hidrográficas y hacer valoraciones económicas del recurso hídrico ofrecido por ellas (Vélez, Poveda & Mesa, 2000, como se citó en Oyata, 2008).

En el caso de la oferta hídrica, la información está ligada a las condiciones climatológicas, régimen hidrológico, variabilidad natural, y características geológicas y de coberturas del área bajo análisis, la cual se expresa como la escorrentía superficial. Esta oferta se contabiliza para cierto periodo de tiempo, utilizando diversas aproximaciones. Sin embargo, no toda el agua que hace parte de la oferta o escorrentía total puede ser usada por el ser humano, ya que se debe considerar un porcentaje para mantener y conservar los ecosistemas fluviales y las necesidades de los usuarios de aguas abajo (IDEAM, 2019).

Con relación a las variables climáticas, se tiene que la temperatura del aire es una de las más importantes; esto se debe a que afecta a todas las actividades humanas, flora, fauna, etc. Está controlada principalmente por la radiación solar entrante, aunque también está muy influenciada por el carácter de la superficie terrestre, y especialmente por las diferencias entre la tierra y el agua, la altitud y los vientos predominantes.

De la misma manera, la precipitación es una fuente importante del ciclo hidrológico y puede definirse como el agua, tanto líquida como sólida, que llega al suelo. La precipitación siempre está precedida por condensación, sublimación o una combinación de estas, y generalmente está asociada con el movimiento vertical del aire. Las formas comunes incluyen lluvia, nieve y granizo y sus variaciones (Aguiló et al., 2014).

Teniendo en cuenta a lo anterior, se tiene que la Evapotranspiración Potencial (ETP) definida como la cantidad máxima de agua capaz de ser perdida por una capa de vegetación verde, continua y de corta altura, cuando es ilimitada la cantidad de agua suministrada al suelo y la Evapotranspiración Real (ETR) se entiende como la cantidad de agua perdida por el complejo planta-suelo en las condiciones meteorológicas, edafológicas y biológicas existentes (Gómez & Cadena, 2017).

De acuerdo con el decreto 50 de 2018, el caudal ambiental es el “Volumen de agua por unidad de tiempo, en términos de régimen y calidad, requerido para mantener el funcionamiento y resiliencia de los ecosistemas acuáticos y su provisión de servicios ecosistémicos”. El caudal ambiental corresponde al insumo para la evaluación de la oferta hídrica disponible de los cuerpos

de agua, por lo que todos los instrumentos relacionados con la evaluación del abastecimiento de agua existente deben armonizarse y sincronizarse con la realidad a futuro dentro de las prioridades.

Para realizar el cálculo del IUA, son necesarios diferentes conceptos, entre las que están el Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) definido como la relación entre un volumen parcial equivalente al área bajo la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales medios diarios, y el volumen total equivalente el área bajo la curva de duración de caudales medios diarios. Muestra la capacidad de retención y regulación hídrica de una unidad hidrográfica, representada en la forma de la curva de duración de caudales medios diarios (IDEAM, 2020)

Además de lo anterior, otra definición importante es la demanda hídrica, entendida como una extracción del sistema hídrico destinada a suplir las necesidades o requerimientos del consumo humano, la producción sectorial y las demandas esenciales de los ecosistemas no antrópicos. La extracción y la utilización del recurso implica: sustracción, alteración, desviación o retención temporal del recurso hídrico (IDEAM, 2010).

Por último, una vez se tenga todos los datos se logra obtener el Índice de uso del agua cuyo valor corresponde a la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores, en un periodo de tiempo t y en una unidad espacial de referencia j en relación con la oferta hídrica superficial disponible para la misma unidad temporal t y espacial j . El indicador se construye para atender las necesidades de planificación nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (Saldarriaga & Carrillo, 2012).

Finalmente, la interpretación de los resultados se hace mediante la escala de presión de la demanda sobre la oferta hídrica disponible se define a partir de los rangos: muy alta, alta, media, baja y muy baja. En la tabla 1 se presentan los rangos y categorías aplicados en el ENA 2010 (IDEAM, 2010).

Tabla 1*Rangos y categorías del Índice de Uso del Agua (IUA)*

Rango (Dh/Oh)*100 IUA	Categoría IUA	Significado
>50	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
20.01 - 50	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
10.01 - 20	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
1 - 10	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
≤ 1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa baja con respecto a la oferta disponible

Fuente. Estudio Nacional del Agua 2010. IDEAM.

3 Metodología

3.1 Revisión bibliográfica

El esquema metodológico utilizado comenzó con una revisión bibliográfica de los diferentes métodos utilizados a nivel internacional y nacional para evaluar el estado de cuencas hidrológicas. De dicha revisión se evidenció que a nivel nacional diferentes entidades tales como el IDEAM, Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico-PORH, POMCAS, universidades como La Pontificia Javeriana y la Fundación Universitaria Católica y diferentes investigadores evalúan el IUA en las cuencas de diferentes ríos y quebradas implementando la metodología propuesta por el IDEAM, en la cual se hace la relación entre la oferta y la demanda hídrica, es por esto que dicho método es el que se pretende implementar en el desarrollo del presente trabajo.

3.2 Área de estudio

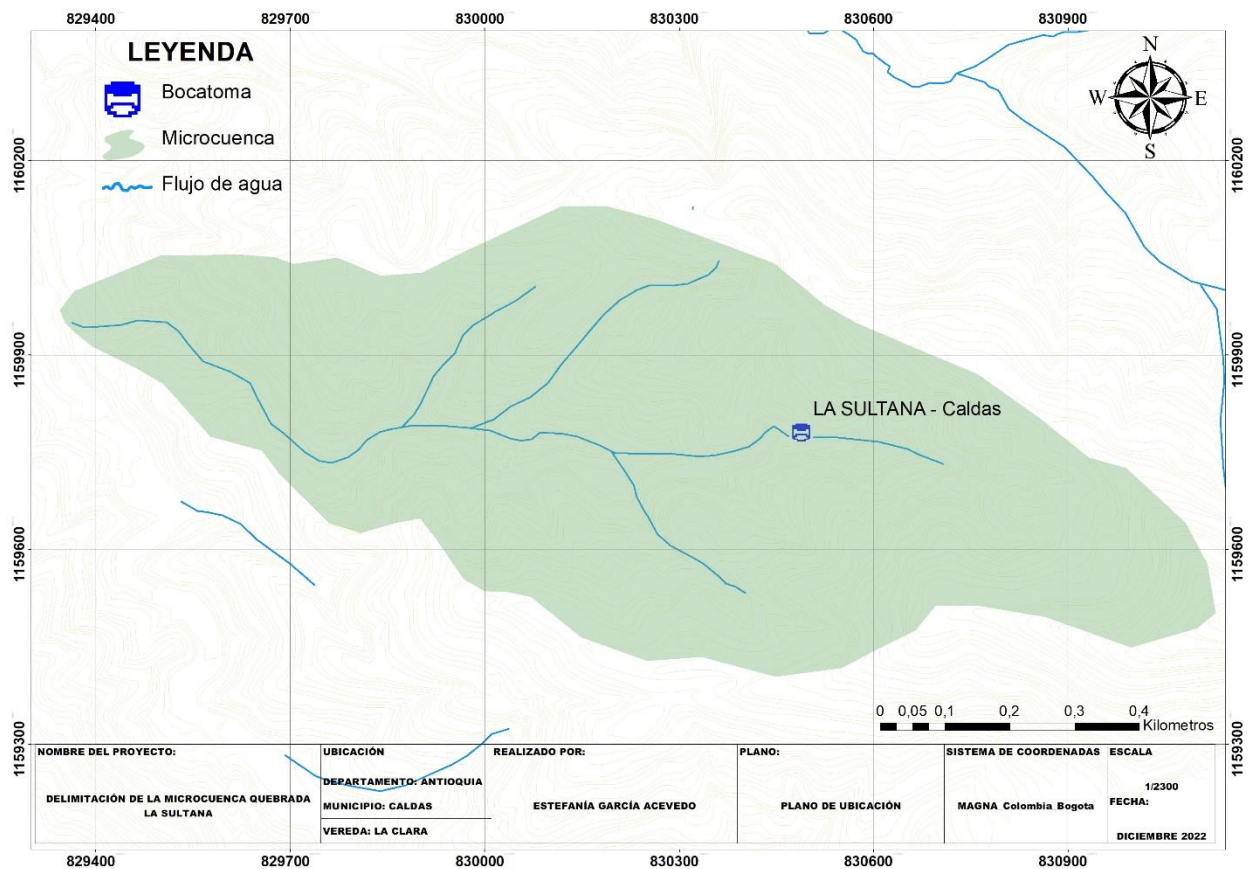
El área de estudio se encuentra dentro de la microcuenca de la quebrada La Sultana, la cual está ubicada en el municipio de Caldas, Antioquia en la vereda La Clara. Esta zona es elegida por la empresa Cipreses de Colombia S.A., para realiza su análisis debido a la importancia a nivel

geográfico y a la cercanía con la población vecina, ya que allí, en los predios de la empresa, nace la quebrada la cuál es abastecedora de una gran cantidad de habitantes.

Para la delimitación del área de estudio (Figura 1) se utilizó el software ArcGIS, tomando diferentes elementos necesarios para la obtención del límite, realizando el modelo de elevación digital DEM, mediante el mapa de Caldas, las curvas de nivel y los drenajes del municipio (datos brindados por la empresa). Como resultado de esto se tiene que la microcuenca cuenta con un área de 0.73 km^2 y una altura promedio de 2070 msnm. El punto designado en amarillo de la figura hace referencia al sitio donde está ubicada la captación del acueducto veredal, cuyas coordenadas geográficas son X: 830484 e Y: 1159774

Figura 1

Microcuenca quebrada La Sultana, Caldas.



3.3 Oferta hídrica

Para las condiciones hidrológicas presentadas en la zona de estudio, se realiza a través de la metodología propuesta por el IDEAM el cálculo de la oferta hídrica natural disponible en la microcuenca (ecuación 1).

$$Oh_{jt} = Oh_{jt \text{ total}} - Oh_{jt \text{ Qamb}} \quad (1)$$

Donde:

Oh_{jt total}: es el volumen total de agua superficial en la unidad espacial de referencia j, en el periodo de tiempo t.

Qamb: es el volumen de agua correspondiente al caudal ambiental en la unidad espacial de referencia j, en el periodo de tiempo t.

Con el enfoque hidrológico se tiene qué, para el Caudal Ambiental (Qamb) se debe cumplir la relación (ecuación 2) teniendo en cuenta el IRH, y la información recolectada en el IDEAM en los años 2010, 2013 y 2014.

$$\begin{aligned} \text{Sí IRH} < 0.7 &\rightarrow \text{Qamb} = \text{Q75\%} \\ \text{Sí IRH} > 0.7 &\rightarrow \text{Qamb} = \text{Q85\%} \end{aligned} \quad (2)$$

El IRH se consulta en el Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) del año 2018 de la Cuenca del Río Aburrá – Medellín, debido a que es allí donde se describe la situación ambiental de la cuenca para cada uno de los subsistemas y variables que componen la unidad de planificación de la región de estudio. Dado que la microcuenca de la quebrada La Sultana hace parte de la cuenca del Río Aburrá, más específico, está dentro de la subcuenca de la quebrada La Miel, resulta beneficioso aprovechar la información previamente analizada. Una vez encontrada y establecido el dato del IRH se verifica su valor y se podrá estimar la manera como se va a tomar el caudal ambiental de acuerdo con los diferentes grados de calificación de este índice.

Para realizar actividades encaminadas a la gestión de los recursos hídricos es necesario determinar la oferta y disponibilidad actual del agua, es por esto por lo que para la ejecución del presente trabajo se estudió “EL MÉTODO DEL BALANCE HIDROLÓGICO DE LARGO PLAZO” (ecuación 3) estudiado en (Álvarez et al., 2008), para aplicarlo a la microcuenca de la quebrada La Sultana, teniendo como resultado una aproximación de la oferta generada en el sitio.

Dentro de los resultados obtenidos en el estudio anteriormente mencionado, y por lo cual es posible aplicar este método en este estudio, es debido a que Los estimativos de los caudales medios de largo plazo son aceptables, usando los métodos de estimación de evapotranspiración de Turc, Cenicafé, Penman, Thornwaite y Coutagne, puesto que el error relativo entre los caudales estimados mediante la ecuación de balance de largo plazo y los datos de los promedios de caudal de las estaciones se encuentra entre el 20% y el 25 %.

$$Q = (P - ETR) * A \quad (3)$$

Donde:

P: Precipitación.

Q: Caudal promedio de largo plazo.

ETR: Evapotranspiración real.

A: Área de la cuenca o microcuenca.

Para la ejecución de los cálculos correspondientes, fue necesario contar con información meteorológica, la cual fue obtenida a través de la página del IDEAM. Se identificó una estación agrometeorológica cercana al sitio de interés la cual tiene el nombre de La Salada código 27015260 con coordenadas geográficas X: 828703 e Y: 1160829. Para esto se tomaron los datos mensuales y diarios de cada una de las variables necesarias precipitación y temperatura respectivamente desde el año 2001 hasta el año 2021.

3.3.1 Precipitación

Se recolectó la información de la página del IDEAM, donde se consiguieron los datos de precipitación de 20 años, sin embargo, fue necesario obtener dichos datos a escala mensual, por lo se estableció y encontró un método adecuado que se adaptó a las condiciones e información con la se contaba.

Inicialmente se calculó la precipitación media mensual de la microcuenca, para esto se utilizó el método aritmético, a través de la ecuación 4, éste es simplemente un promedio de las precipitaciones registradas en las distintas estaciones consideradas dentro de la cuenca (Rodríguez,

2017). Como consecuencia de que sólo se tiene una estación meteorológica en el municipio de Caldas, y otros métodos como Las Isoyetas, Polígonos de Thiessen, entre otros utilizan más de una estación para su desarrollo, es que se eligió el método aritmético, teniendo el promedio de los datos mensuales de todos los años.

$$P_{mensual\ multianual} = \frac{P_{promedio\ en\ la\ estación}}{N} \quad (4)$$

Donde:

P: Precipitación (mm/mes).

N: Número de estaciones.

Algunos datos mensuales no fueron obtenidos de los datos de la estación, por lo que es necesario completarlos. Para esto también se encuentran disponibles diferentes métodos, pero debido a la falta de información de otras estaciones, se realiza de igual manera con el dato de la precipitación mensual multianual.

3.3.2 Evapotranspiración potencial

Se asumen que la evapotranspiración es uniforme dentro del área delimitada, es por esto que se calculó mediante alguno de los métodos que permite obtener valores mensuales como: Thornthwaite-Mather, Turc, Jensen-Haise y Blaney-Criddle (Bradbury et al., 2000). En la aplicación que se presenta se usó la ecuación empírica de Thornthwaite (ecuación 5).

$$EVP = 1.6 * \left(10 \frac{T}{l}\right)^a \quad (5)$$

Donde:

T: Temperatura media mensual (°C).

ETP: Evapotranspiración potencial de la microcuenca (cm/ año y mes).

l: Índice calórico anual dado por:

$$l = 12 \left(\left(\frac{T_{anual}}{5} \right)^{1.514} \right) \quad (6)$$

Y a es un exponente dado en función de l, como se muestra a continuación:

$$a = (675 * 10^{-9}) * l^3 - (771 * 10^{-7}) * l^2 + (179 * 10^{-4}) * l + 0.492 \quad (7)$$

En el caso de la evapotranspiración potencial anual, se realiza a través de la metodología Cenifacé (ecuación 8), debido a que es la que mejor se adapta a las condiciones del lugar, dado que, es una ecuación que fue obtenida realizando una regresión a los valores obtenidos de aplicar el método de Penman a los datos de sus estaciones climáticas en Colombia (Jaramillo, 2006).

$$ETP = 1017.17e^{(-0.002H)} \quad (8)$$

Donde:

H: Elevación sobre el nivel del mar (msnm).

ETP: Evapotranspiración potencial de la microcuenca (mm/año).

La temperatura media mensual corresponde al promedio aritmético de los valores de temperatura ambiente media diaria medidos durante un mes en la estación de monitoreo, y el promedio anual se calcula a partir del registro de seis o más datos mensuales (IDEAM, 2013)

3.3.3 Evapotranspiración real

Como consecuencia de que se está suponiendo un balance hidrológico a largo plazo, resulta conveniente utilizar la teoría de Budyko, basada en los balances de agua y de energía de largo plazo, considera una interrelación entre la evapotranspiración real, la cual expresa a través de la precipitación y la evapotranspiración potencial (Budyko & Miller, 1974; Carmona, Poveda, & Bustamante, 2014), el cálculo de la evapotranspiración real anual mediante esta teoría se realiza a través de la Ecuación 6 (Vélez et al., 2000).

$$ETR = \left(ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) * \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right) \right)^{0.5} \quad (9)$$

Donde:

P: Precipitación media en la microcuenca (mm/ año y mes).

ETP: Evapotranspiración potencial de la microcuenca (mm/mes).

ETR: Evapotranspiración real de la microcuenca (mm/ año y mes).

3.4 Demanda hídrica

La demanda hídrica es la sumatoria del agua extraída para los diferentes usos sectoriales, en un período de tiempo determinado, pero, en este caso sólo se tendrá en cuenta para la microcuenca el uso doméstico, debido a que es el único legalmente autorizado por la jurisdicción de la zona, y es para el cuál se tiene una dotación establecida.

Corantioquia, desde el año 1998, a través de la oficina territorial Aburrá Sur, por solicitud de la junta de acción comunal de la vereda La Clara, y en compañía de la empresa Cipreses de Colombia, ha brindado una concesión de aguas para el acueducto veredal de 1.23 L/s únicamente para uso doméstico. Esta captación se realiza en predios de la empresa, cuya fuente hídrica que brinda el servicio es la quebrada La Sultana.

Con el fin de encontrar la presión más alta que se genera en la microcuenca, la cuál es el agua para uso doméstico, se realizan los cálculos suponiendo que toda esa cantidad de agua que puede utilizar la comunidad beneficiada del acueducto, si es realmente consumida a lo largo del mes. Para encontrar el dato en m³/mes, partiendo de la información que está en L/s, se realiza la conversión de la ecuación 10.

$$Demanda Dh \left(\frac{m^3}{mes} \right) = Demanda \left(\frac{L}{s} \right) * \left(\frac{1m^3}{1000L} \right) * \left(\frac{86400s}{1día} \right) * \left(\frac{30días}{1mes} \right) \quad (10)$$

3.5 Índice de uso de agua

Finalmente, una vez se tenga la información requerida, se procede a realizar la relación porcentual de la demanda hídrica, ejercida por el uso doméstico, y la oferta hídrica disponible (ver ecuación 11) para la microcuenca de la quebrada La Sultana.

$$IUA = \frac{Dh}{Oh} * 100\% \quad (11)$$

Donde:

IUA: Índice de uso de agua.

Dh: Demanda hídrica (m³/mes y año).

Oh: Oferta hídrica (m³/mes y año).

4 Resultados

Todos los datos recolectados a partir de la información de la página del IDEAM, se ven reflejado en las tablas del Anexo 1, donde se presentan los datos de la estación La Salada tanto de precipitación y temperatura.

4.1 Resultado oferta hídrica

Los datos de precipitación fueron ordenados mes a mes a través de una tabla en el Anexo 1. A continuación, el resumen de la precipitación mensual (véase en tabla 2), donde se encuentra la información con las que se realizó los cálculos de evapotranspiración y oferta hídrica.

Tabla 2

Precipitación mensual para la microcuenca de la quebrada La Sultana

Parámetro	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agt	Sept	Oct	Nov	Dic
	Precipitación mensual Multianual (mm/mes)		106,31	113,05	189,10	286,15	328,90	192,32	171,32	196,64	256,59	309,39	278,52

* Los resultados se obtuvieron del promedio mensual de todos los meses desde el año 2001 al 2021.

La precipitación promedio multianual tuvo como resultado un valor de 2898,02 mm/año. Con este dato se realiza el cálculo anual de la oferta hídrica y la evapotranspiración.

En el caso de la temperatura media, se estimó a partir de los resultados diarios de la temperatura máxima y mínima. Esto debido a que la estación La Salada sólo brindan esta información, y fue necesaria su adaptación para la obtención de los datos requeridos, que, en este caso, es la temperatura media mensual y anual.

Tabla 3*Temperatura media para la microcuenca de la quebrada La Sultana*

Parámetro	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agt	Sept	Oct	Nov	Dic
	Temperatura mensual Multianual (°C/mes)		18,2	18,6	18,6	18,4	18,6	18,5	18,5	18,6	18,4	18,2	18,2

* Los resultados se obtuvieron a partir de los promedios diarios, obteniendo un promedio mensual de todos los meses desde el año 2001 al 2021.

Para el caso de la Evapotranspiración potencial mensual, se encontró que el índice calórico anual tuvo un valor de 86,52, y el exponente a fue igual 1,90. Con estos valores se pueden aplicar la fórmula de la ETP, cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4*Evapotranspiración potencial mensual para la microcuenca de la quebrada La Sultana*

Parámetro	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agt	Sept	Oct	Nov	Dic
	ETP (mm/mes)		66,07	68,51	68,64	67,36	68,24	68,11	67,99	68,58	67,22	66,00	65,90

* Los resultados se obtuvieron aplicando la fórmula Thornthwaite.

En el caso de la ETP anual, la cual se realizó usando la fórmula de Cenicafé dio como resultado un valor de 672,35 mm/año.

Posteriormente, con los resultados de ETP mensual y anual, se procedió a aplicar la fórmula de Budyko para la obtención de la ETR mensual y anual de la microcuenca (véase tabla 5).

Tabla 5*Evapotranspiración real mensual para la microcuenca de la quebrada La Sultana*

Parámetro	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agt	Sept	Oct	Nov	Dic
	ETR (mm/mes y año)		54,78	57,18	62,61	63,57	64,85	62,28	61,37	62,81	63,01	62,63	62,17

* Los resultados se obtuvieron aplicando la fórmula de Budyko.

Para la ETR anual se obtuvo un resultado de 630.93 mm/año.

Para obtener el caudal de la microcuenca, se necesita la precipitación, la ETR y el área de la zona. Luego de realizar el procedimiento correspondiente, el cual mensual y anual es:

Tabla 6

Caudal mensual para la microcuenca de la quebrada La Sultana

Parámetro	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agt	Sept	Oct	Nov	Dic
Caudal (m ³ /mes)		37615,89	40785,45	92341,19	162484,94	192757,78	94929,45	80260,42	97693,55	141306,64	180134,78	157937,41	80282,25

* Realizado con la fórmula de caudal a largo plazo.

El valor del caudal anual de la microcuenca se estimó de 1436045,92 m³/año.

Finalmente, para calcular la oferta hídrica, debe realizarse la resta del caudal mensual y anual (oferta total) de la microcuenca, y el valor del caudal ambiental.

En el POMCA 2018, se han encontrado que, en todas las subcuencas, se tiene una calificación alta (0.75 – 0.85), y muy alta (> 0.85), lo que significa que en esos sitios se tiene alta y muy alta retención y regulación de humedad respectivamente. La microcuenca de la quebrada La Sultana, al encontrarse dentro de la cuenca de la quebrada La Miel, es factible realizar la relación y encontrar que el sitio en cuestión tiene un IRH > 0.7, por lo tanto, el caudal ambiental es Q_{85%} del caudal total. Los resultados de los mencionado anteriormente se presentan a continuación:

Tabla 7*Caudal ambiental y oferta hídrica mensual para la microcuenca de la quebrada La Sultana*

Parámetro	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agt	Sept	Oct	Nov	Dic
	Qamb (m ³ /mes)		5642,38	6117,82	13851,18	24372,74	28913,67	14239,42	12039,06	14654,03	21196,00	27020,22	23690,61
Oferta Oh (m ³ /mes)		31973,50	34667,63	78490,01	138112,20	163844,11	80690,04	68221,36	83039,52	120110,64	153114,56	134246,80	68239,91

Los valores anuales que se obtuvieron fueron 215406,89 m³/año y 1220639,03 m³/año para el caudal ambiental y la oferta hídrica para la microcuenca respectivamente.

4.2 Resultados demanda hídrica

Una vez se tiene el dato de la concesión en L/s, este sólo se convierte a m³/mes y se asume que el consumo sería el mismo para todo el año. El valor anual corresponde a la suma de los 12 meses.

Tabla 8*Demanda hídrica mensual para la microcuenca de la quebrada La Sultana*

Parámetro	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agt	Sept	Oct	Nov	Dic
	Demanda hídrica (m ³ /mes)		3188,16	3188,16	3188,16	3188,16	3188,16	3188,16	3188,16	3188,16	3188,16	3188,16	3188,16

La suma de los 12 meses, o la demanda anual arrojó un resultado de 38257,92 m³/año.

4.3 Índice de uso de agua

A partir de los valores obtenidos de oferta y demanda hídrica, se hace la relación y con la tabla 1 se evalúa el resultado, teniendo la siguiente información:

Tabla 9

Índice de uso de agua mensual y anual para la microcuenca de la quebrada La Sultana

Parámetros	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agt	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
IUA		9,97	9,32	4,12	2,34	1,97	4,01	4,74	3,89	2,69	2,11	2,41	4,74	3,18

Este resultado es congruente con el POMCA 2018, ya que allí se observa que en el municipio de Caldas se tiene un IUA bajo y muy bajo para una condición hidrológica media.

5 Análisis

La microcuenca de la quebrada La Sultana resulta ser de gran interés, no sólo para la empresa Cipreses de Colombia S.A, sino, para el municipio de Caldas, pues de ella se abastece el acueducto veredal La Clara. Como consecuencia de esto, realizar una evaluación de la disponibilidad hídrica permite conservar el recurso y de ser necesario, tomar medidas de mitigación con respecto a la gestión integral.

5.1 Análisis oferta hídrica

El procedimiento realizado a nivel mensual multianual en el periodo de 2001 a 2021 para determinar la oferta hídrica de la microcuenca de la quebrada La Sultana, permitió obtener valores sobre el comportamiento del caudal que se genera en el sitio. Teniendo que los meses con menor cantidad de lluvia, son directamente proporcionales a los meses con menor oferta, en este caso enero y febrero, y por consiguiente los meses de octubre y mayo, que fueron los meses donde se presentó mayor precipitación, tienen una alta oferta de agua.

5.2 Análisis demanda hídrica

El uso del agua es un elemento de análisis fundamental para definir el estado actual del recurso hídrico en la microcuenca de la quebrada La Sultana, al sólo tener en cuenta el uso para consumo humano, se están excluyendo otras actividades que también requieren gran cantidad de agua, entre las que se encuentran los sectores agrícola, industrial, acuícola, entre otros.

La empresa Cipreses de Colombia dentro de sus predios tiene prohibido otro tipo de uso que no sea el doméstico, es por esto otros usos diferentes a estos no se consideraron, pero es posible que fuera del área de la empresa, se pueda estar ejerciendo una extracción ilegal del recurso, por lo que no se contaría con información real de este tipo de usos.

Los resultados de demanda hídrica mensual fueron los mismos para todos los meses, dado que, sólo se estimó el valor para la concesión de aguas otorgada para uso doméstico. Sin embargo, esta metodología en cuanto a esta demanda podría dar sobre estimaciones por cuenta de que se está realizando la validación con la presión más alta que se puede tener, y no con la cantidad real que se está consumiendo.

5.3 Análisis IUA

A partir de los valores obtenidos de la relación entre la oferta y demanda hídrica de la microcuenca, y por lo tanto el resultado del índice de escasez mediante la aplicación de la fórmula, se logra evidenciar que la oferta neta supera la demanda doméstica del sitio de estudio, lo que demuestra un poco intervención por parte del uso doméstico sobre la microcuenca.

Teniendo en cuenta que la demanda durante todo el año se asume que es la misma, y, en consecuencia, el único valor variable de la relación oferta – demanda es precisamente la oferta, se tiene que los meses donde menor oferta existió, es donde se tiene un mayor resultado de IUA, no obstante, su valor en ningún mes del año logró superar el rango de 10.01 puntos, lo que significa que la presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible durante todo el año.

6 Conclusiones

Al desarrollar el presente trabajo, se reafirma la gran importancia que tienen los sistemas de información geográfica como el ArcGIS, debido a que son herramientas que permiten desarrollar diversos estudios y análisis. En este caso en específico, permitió delimitar y establecer el área de estudio de la microcuenca.

En el modelo de balance hídrico a largo plazo del área de estudio, observamos datos meteorológicos del período de años de 2001 al 2021, lo que es un total de 20 años, correspondientes a la única estación meteorológica del municipio de Caldas. Periodo de tiempo con datos que permitieron la representación de la distribución espacial y análisis del ciclo anual de variables climáticas como precipitación, temperatura y evapotranspiración; además de determinar la oferta hídrica superficial.

La oferta hídrica de la microcuenca de la quebrada La Sultana, debido al comportamiento de la lluvia a lo largo del año en el municipio de Caldas, no permite que se presente una situación de escasez o un alto IUA, aun cuando existe una concesión de una bocatoma para el acueducto veredal de la vereda La Clara.

La demanda hídrica total es de 38257,92 m³/año, este valor de caudal promedio anual corresponde al requerimiento de agua de uso doméstico identificado y legalmente constituido dentro de la zona de estudio, pero al no verificar otros tipos de usos, y no instaurar la cantidad de personas que consumen el agua, no es posible establecer un valor cercano al real para la microcuenca.

El IUA calculado con la metodología brindada por el IDEAM, no denota una gran explotación del recurso hídrico superficial, sin embargo, para realizar una evaluación más objetiva para el cálculo del indicador, se deben incluir la oferta de aguas subterráneas como posible insumo para el abastecimiento de la población.

La relación oferta/demanda hídrica constituye un indicador del estado del recurso hídrica de la zona, al expresarlo mediante el IUA, permite tomar decisiones de vital importancia sobre el uso y gestión del recurso hídrico, por lo tanto, se recomienda tener un mayor control sobre las cuencas y microcuencas del territorio para adelantar la implementación de programas de uso eficiente y ahorro del agua.

Finalmente, en el desarrollo de la presente investigación se tuvieron diferentes limitaciones en cuanto a la falta de información y por lo tanto, la metodología utilizada fue la que mejor se ajustó para la solución de los objetivos planteados inicialmente, como es el caso de que en la zona de estudio no se tienen otro tipo de demandas legales, la demanda total doméstica se realizó bajo el supuesto de consumo total de agua concesionada y no del número de usuarios debido a que no se cuenta con la información, el hecho de que sólo se tiene una única estación meteorológica en el municipio de Caldas y por lo tanto se presentaron faltantes de los datos de precipitación que tuvieron que resolverse con promedios aritméticos.

Referencias

- Aguiló, M. et al. (2014). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico* (4.^a ed.). Fundación Conde del Valle de Salazar (E.T.S.I. de Montes).
- Álvarez, O. D. et al. (2008). *INCERTIDUMBRE ASOCIADA CON EL BALANCE HÍDRICO DE LARGO PLAZO*. Universidad Nacional de Colombia.
- Bradbury, K., Dripps, W., Hankley, C., Anderson, M & Potter, K. (2000). *Refinement of two methods for estimation of groundwater recharge rates*. Wisconsin. University of Wisconsin.
- Budyko, M. I., & Miller, D. H. (1974). *Climate and Life*. (International Geophysics Series, Ed.) (Vol. 18). New York and London.
- Calder, I., Hofer, T., Vermont, S., & Warren, P. (2007). Hacia una nueva comprensión de los bosques y el agua. *Unasylva: revista internacional de silvicultura e industrias forestales*, 58(No. 229), 3–10. <https://www.fao.org/3/a1598s/a1598s02.htm>
- Carmona, A., Poveda, G., & Bustamante, E. (2014). A scaling approach to Budyko's framework and the complementary relationship of evapotranspiration. In Press.
- Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia), Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Amva) & Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Rios Negro y Nare (Cornare). (2018). *PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ABURRÁ – POMCA*.
- Decreto 50 de 2018. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015, Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en relación con los Consejos Ambientales Regionales de la Macrocuencas (CARMAC), el Ordenamiento del Recurso Hídrico y Vertimientos y se dictan otras disposiciones. 16 de enero de 2018.
- Delgado Lindeman, S & Quintana Canabal, C. (2014). *Determinación del índice de escasez en la cuenca del río Guachaca en el Departamento del Magdalena*. Universidad de Cartagena.

-
- Díaz, K. P. (2019). EL ORO AZUL Y SU GESTIÓN DE PÉRDIDAS EN COLOMBIA. *MÓDULO ARQUITECTURA CUC*, 23, 9–22. <https://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.23.1.2019.01>
- Domínguez, E. A., Rivera, H.G., Vanegas, R., Moreno, P. (2008). Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 32(123): 195-212. ISSN 0370-3908.
- Gómez, J. A. & Cadena, M. C. (2017). *VALIDACIÓN DE LAS FÓRMULAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ETo) PARA COLOMBIA*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.
- Gutiérrez, C. P., Díaz, C. & Muñoz, J. N. (2015). *CÁLCULO DEL ÍNDICE DE ESCASEZ DE LA CUENCA DEL RÍO OPIA - DEPARTAMENTO DEL TOLIMA*. [Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos]. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá: Ideam: 452 pp.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2010). Estudio Nacional del Agua 2010.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2013). Hoja metodológica del indicador promedio de temperatura media del aire (Versión 1,1). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM. 7p
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2020). Hoja metodológica del Índice de Retención y Regulación Hídrica (Versión 1,2). 19 p.
- Jaramillo, A. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia. 57(4), 288–298.

-
- Olasoji, S., Oyewole, N., Abiola, B., & Edokpayi, J. (2019). Water Quality Assessment of Surface and Groundwater Sources Using a Water Quality Index Method: A Case Study of a Peri-Urban Town in Southwest, Nigeria. *Environments*, 6(2), 23. <https://doi.org/10.3390/environments6020023>
- Otaya, L. A., Vasquez, G. L., & Bustamante, G. (2008). ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA CON INFORMACIÓN ESCASA EN ECOSISTEMAS ESTRATÉGICOS. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, 61(1), 4366–4380. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472008000100013
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Lacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management*, 108, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>
- Rodríguez, L. M. (2017). *Generación de curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia para la cuenca del Río Jipijapa, del cantón Jipijapa, provincia de Manabí*. [Proyecto de titulación]. Universidad estatal del sur de Manabí.
- Saldarriaga G. y Carrillo L.M (2012). *Hoja metodológica del indicador Índice de Uso del Agua* (Versión 1,00). Objetivo del Milenio 7– ODM7, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM y Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. 17 p.
- Sutorius, M., & Rodríguez, S. (2015). La fundamentalidad del derecho al agua en Colombia. *Revista Derecho del Estado*, 35, 243. <https://doi.org/10.18601/01229893.n35.09>
- Vélez, J. I., Poveda, G., & Mesa, O. J. (2000). *Balances hidrológicos de Colombia*. Medellín.

Anexos

El siguiente archivo se encuentra en el documento adjunto:

ANEXO 1: Resultados IUA La Sultana