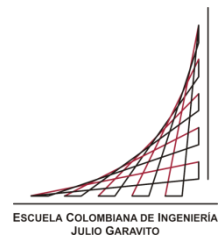


Maestría en Ingeniería Civil

Análisis crítico de la metodología implementada por el IDEAM y las empleadas en el ámbito internacional para la definición del índice de escasez del agua superficial.

Jorge Andrés Vega Ortiz

Bogotá, D.C., 19 de noviembre de 2018



Análisis crítico de la metodología implementada por el IDEAM y las empleadas en el ámbito internacional para la definición del índice de escasez del agua superficial.

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Recurso Hidráulicos y Medio Ambiente

Ing. Héctor Matamoros Rodríguez

Ingeniero Civil

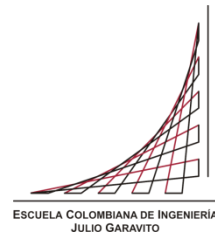
Director

Jurado:

Ing. German Santos

Ing. German Acero

Bogotá, D.C., 19 de noviembre de 2018



NOTA DE ACEPTACIÓN

La tesis de maestría titulada " Análisis crítico de la metodología implementada por el IDEAM y las empleadas en el ámbito internacional para la definición del índice de escasez del agua superficial", realizada por el estudiante Jorge Andrés Vega Ortiz, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, fue evaluada como APROBADA por el jurado evaluador el día _____.

Ingeniero Civil, German Santos

Jurado Evaluador

Ingeniera Civil, German Acero

Jurado Evaluador

Ingeniero Civil, Héctor Matamoros Rodríguez

Director del proyecto

Bogotá, D.C., Fecha: _____

AGRADECIMIENTOS

Héctor Matamoros Rodríguez, Ingeniero Civil y Director de Tesis, por su constante apoyo y orientación durante toda la maestría y elaboración de este trabajo.

Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", por facilitarme las herramientas necesarias durante todo el desarrollo de este trabajo.

Padres, hermanos y demás familiares, por su apoyo y motivación en la culminación de este trabajo de grado.

Todas las personas que de una u otra forma contribuyeron a la culminación de este trabajo de grado.

RESUMEN

El siguiente documento trata la temática de la metodología para el cálculo del índice de escasez elaborada por el IDEAM, para lo cual se abordarán los siguientes aspectos: la descripción de algunas metodologías de cálculo usadas a nivel internacional, exactamente en Estados Unidos, Israel, Países Bajos y Canadá; críticas de autores nacionales sobre la metodología, ventajas y desventajas del indicador de escasez, y finalmente, los ajustes propuestos para el cálculo del indicador.

Adicionalmente se elabora una guía práctica para su cálculo teniendo en cuenta los resultados de los análisis efectuados, se sugieren actualizaciones a la vigente metodología con nuevos rangos para medir el indicador de escasez, se presentan conclusiones y recomendaciones. Finalmente se aplica todo lo anterior en un estudio de caso.

Este trabajo es presentado como una herramienta de fácil uso para estimar el indicador de escasez, siendo esta útil en la toma de decisiones referentes al manejo adecuado del recurso hídrico del país.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	12
ANTECEDENTES.....	13
OBJETIVOS.....	17
1 MARCO CONCEPTUAL Y LEGAL.....	18
1.1 MARCO CONCEPTUAL.....	18
1.1.1 Caudal.....	18
1.1.2 Caudal medio.....	18
1.1.3 Precipitación.....	18
1.1.4 Evapotranspiración.....	18
1.1.5 Oferta hídrica superficial.....	18
1.1.6 Caudal ecológico.....	19
1.1.7 Escurrimiento superficial.....	19
1.1.8 Infiltración.....	19
1.1.9 Cuenca hidrográfica.....	20
1.1.10 Microcuenca.....	20
1.1.11 Demanda hídrica.....	20
1.1.12 Uso Consultivo.....	20
1.1.13 Uso no consuntivo.....	20
1.1.14 Uso doméstico.....	21
1.1.15 Uso industrial.....	21
1.1.16 Uso del sector de servicios.....	21
1.1.17 Uso agrícola.....	21
1.1.18 Coeficiente de cultivo (kc).....	21
1.1.19 Uso pecuario.....	21
1.1.20 Escasez.....	22
1.1.21 Índice de escasez.....	22
1.1.22 Balance oferta – demanda de agua.....	23
1.2 MARCO LEGAL.....	24
1.2.1 Constitución política de Colombia de 1991.....	24
1.2.2 Ley 99 de 1993.....	24
1.2.3 Decreto 1541 de 1978.....	24
1.2.4 Decreto 2857 de 1981.....	24
1.2.5 Decreto 1900 de 2006.....	25
1.2.6 Decreto 1323 de 2007.....	25
1.2.7 Decreto 1640 de 2012.....	25
1.2.8 Decreto 0953 de 2013.....	25
1.2.9 Resolución 1096 de 2000.....	26
1.2.10 Resolución 865 de 2004.....	26
1.2.11 Resolución 872 de 2006.....	26
1.2.12 Resolución 330 de 2017.....	26
2 MARCO TEÓRICO.....	27
2.1 ESCASEZ.....	27

2.1.1	<i>Requerimientos de agua de los seres humanos</i>	28
2.1.2	<i>Vulnerabilidad del recurso hídrico</i>	29
2.1.3	<i>Requerimientos ambientales de agua</i>	37
2.2	FORMAS DE ESTIMAR EL ÍNDICE DE ESCASEZ A NIVEL MUNDIAL.....	38
2.2.1	<i>Estados Unidos</i>	38
2.2.2	<i>Canadá</i>	40
2.2.3	<i>Israel</i>	45
2.2.4	<i>Países Bajos</i>	46
2.2.5	<i>Colombia</i>	48
2.3	MEJORAS SUGERIDAS A LA METODOLOGÍA IDEAM.....	56
2.3.1	<i>Propuestas de mejoramiento para el cálculo de la oferta</i>	57
2.3.2	<i>Propuestas de mejoramiento cálculo de demanda</i>	64
2.4	ANÁLISIS DE DEBILIDADES, OPORTUNIDADES, FORTALEZAS Y AMENAZAS (DOFA) A LOS DIFERENTES ENFOQUES DE CALCULO DE LA OFERTA Y LA DEMANDA.....	70
3	PROCEDIMIENTO PRACTICO PROPUESTO PARA EL CALCULO DE ÍNDICE DE ESCASEZ	78
3.1	GENERALIDADES.....	78
3.1.1	<i>Recopilación y análisis de información</i>	79
3.1.2	<i>Calculo de índice de escasez</i>	79
4	APLICACIÓN PRACTICA DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CALCULO ÍNDICE DE ESCASEZ	99
4.1	LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	99
4.2	METODOLOGÍA.....	101
4.2.1	<i>Recolección de información hidro-meteorológica para cuenca de estudio</i>	101
4.2.2	<i>Estimación de valores faltantes de series</i>	102
4.2.3	<i>Cálculo de oferta</i>	102
4.2.4	<i>Cálculo de la demanda</i>	112
4.3	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGÍAS PARA EL CALCULO DEL ÍNDICE DE ESCASEZ.....	117
4.3.1	<i>Índice relativo local de uso y re-uso de agua</i>	119
4.3.2	<i>Índice de estrés hídrico</i>	120
4.3.3	<i>Índice de escasez metodología IDEAM</i>	122
4.3.4	<i>Índice de sostenibilidad de la cuenca</i>	129
5	CONCLUSIONES	133
6	RECOMENDACIONES	136
7	REFERENCIAS	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de escasez índice de Falkenmark y WTA	29
Tabla 2 Indicadores y parámetros.....	32
Tabla 3 Descripción de los parámetros de presión, niveles y valores.....	32
Tabla 4 Descripción de los parámetros de estado, niveles y valores.....	33
Tabla 5 Descripción de los parámetros de respuesta, niveles y valores.....	34
Tabla 6 Clasificación de estrés hídrico de acuerdo con el índice de escasez de agua.....	36
Tabla 7 Clasificación de cuencas de acuerdo con WSI	38
Tabla 8 Lista de indicadores metodología CWSI	41
Tabla 9 Categorías del índice de disponibilidad anual de agua	49
Tabla 10 Rangos y categorías del índice del uso del agua (IUA)	54
Tabla 11 Matriz de comparación de metodologías para el cálculo de la oferta en Colombia.	59
Tabla 12 Escala de reducciones por irregularidad temporal de la oferta hídrica.....	63
Tabla 13 Matriz de comparación de metodologías para el cálculo de la demanda en Colombia.....	66
Tabla 14 Matriz DOFA de los diferentes métodos para cálculo de la Oferta	72
Tabla 15 Matriz DOFA de los diferentes métodos para cálculo de la demanda	74
Tabla 16 Etapa y descripción de las actividades - metodología	78
Tabla 17 Escala de reducciones por irregularidad temporal de la oferta hídrica.....	88
Tabla 18 Consumo diario de agua para Bovinos	95
Tabla 19 Demanda sector Bovino.....	95
Tabla 20 Demanda hídrica Bovino línea de producción.....	95
Tabla 21 Demanda hídrica Bovino línea de producción.....	96
Tabla 22 Demanda hídrica Ovino línea de producción.	96
Tabla 23 Demanda hídrica Piscícola línea de producción.	97
Tabla 24 Demanda hídrica sector aves	97
Tabla 25 Áreas Hidrológicas Cuenca el Curo	100
Tabla 26 Áreas Hidrológicas Cuenca el Curo	101
Tabla 27 Valores medios mensuales de caudales generados para subcuenca (m ³ /seg) de la Quebrada El Curo	102
Tabla 28 Valores caudales mínimos esperados (m ³ /seg) para diferentes periodos de retorno en cada subcuenca para la Quebrada El Curo	104
Tabla 29 Estaciones Hidrométricas usadas para el cálculo de ARF.....	105
Tabla 30 Caudales máximos en función del periodo de retorno (m ³ /s).....	105
Tabla 31 Evaluación de la homogeneidad de las estaciones seleccionadas	106
Tabla 32 Índices de crecientes Q _{T_r} /Q _{2.33} estimados de las cuencas instrumentadas	107
Tabla 33 Caudales máximos en (m ³ /s) para diferentes periodos de retorno	108
Tabla 34 Caudales obtenidos para la estación Boca.	110
Tabla 35 Caudal ambiental Q ₇₅ para el área de drenaje de la Quebrada el Curo.....	111

Tabla 36 Oferta hídrica neta integral estimada para cada subcuenca en (m ³ /s) para año hidrológico medio	111
Tabla 37 Oferta hídrica neta integral estimada para cada subcuenca en (m ³ /s) para año hidrológico seco...	112
Tabla 38 Módulos de consumo agrícola	113
Tabla 39 Valores de dotación neta	113
Tabla 40 Consumo bruto teórico sector servicios	114
Tabla 41 Modulo de consumo sector Industrial.....	115
Tabla 42 Número de especies para el uso pecuario.....	115
Tabla 43 Demanda hídrica total para cada subcuenca en (L/s).....	116
Tabla 44 Demanda hídrica total por uso de cada subcuenca	116
Tabla 45 Criterio de calificación del índice de escasez.....	118
Tabla 46 Resultado del cálculo de Índice WTA para cada Subcuencas año hidrológico medio	119
Tabla 47 Resultado del cálculo de Índice WTA para cada Subcuencas año hidrológico seco	120
Tabla 48 Resultado del cálculo de Índice de estrés hídrico para cada Subcuencas año hidrológico medio...	121
Tabla 49 Resultado del cálculo de Índice de estrés hídrico para cada Subcuencas año hidrológico seco	121
Tabla 50 Resultado del cálculo de Índice de Escasez para cada Subcuencas año hidrológico medio.....	123
Tabla 51 Resultado del cálculo de Índice de Escasez para cada Subcuencas año hidrológico seco	123
Tabla 52 Comparación de resultado del cálculo de Índice de Escasez para cada Subcuencas año hidrológico medio	124
Tabla 53 Resultado del cálculo de Índice de Escasez para cada Subcuencas año hidrológico seco	125
Tabla 54 Categorías e interpretación propuesta para definir el indicador de escasez.....	126
Tabla 55 Comparación de las categorías para definir el indicador de escasez.	127
Tabla 56 Resultado del cálculo de Índice de Escasez para cada Subcuencas año hidrológico medio.....	128
Tabla 57 Resultado del cálculo de Índice de Escasez para cada Subcuencas año hidrológico seco.....	128
Tabla 58 Evaluación de los parámetros de presión, niveles y valores.....	130
Tabla 59 Evaluación de los parámetros de estado, niveles y valores para la Cuenca El Curo.....	130
Tabla 60 Evaluación de los parámetros de respuesta, niveles y valores para la cuenca El Curo	131
Tabla 61 Valores de indicadores e índice de sostenibilidad de la cuenca, año seco y medio.	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de flujo para determinar la oferta hídrica superficial	89
Figura 2 Mapa de proceso para determinar la demanda de agua	98
Figura 3 Localización área de drenaje El Curo	99
Figura 4 Áreas Hidrológicas Cuenca el Curo	100
Figura 5 Relación caudal máximo medio anual ($Q_{2,33}$) vs Área de Drenaje.	107
Figura 6 Período de Retorno vs Relación caudal máximo medio anual ($Q_{2,33}$).– Curva Regional .	108
Figura 7 Curva de duración de caudales	110

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1

- HOJA DE CÁLCULO CAUDALES MÁXIMOS
- HOJA DE CÁLCULO CAUDALES MEDIOS
- HOJA DE CÁLCULO CAUDALES MÍNIMOS
- HOJA DE CÁLCULO ÍNDICES HIDROLÓGICOS
- HOJA DE CÁLCULO CÁLCULOS HIDROLÓGICOS DE OFERTA
- DATOS ESTACIONES IDEAM

ANEXO 2

- HOJA DE CÁLCULO DEMANDA

INTRODUCCIÓN

Este documento analiza las metodologías utilizadas para el cálculo del indicador de escasez de agua superficial, incluye algunas experiencias del cálculo desarrolladas a nivel nacional e internacional, su definición, relación de los diferentes métodos de cálculo-existentes para su obtención, ventajas y desventajas que estos métodos presentan, así como los procedimientos que se deben tener en cuenta al momento de realizar los cálculos del indicador. Finalmente se proceder a elaborar una guía práctica de cálculo del indicador.

El marco conceptual sirve como guía de consulta para la correcta comprensión de la información, ver Capítulo uno (1), el cual relaciona los términos que se implementan al largo del documento.

El Capítulo dos (2) expone el marco teórico, aquí se relacionan algunas metodologías investigadas a nivel nacional e internacional para el cálculo del indicador de escasez; resaltando bondades y falencias que se puedan presentar a momento de usarlas. Se describe la metodología recomendada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para el cálculo del indicador y se presentan a modo de resumen las virtudes y críticas realizadas por autores al momento de implementar la metodología. Este análisis servirá como soporte para designar el camino y sentar las bases sobre el uso de la metodología en el país, permitiendo su aplicación en procesos de planificación de la demanda y de la oferta de las cuencas hidrográficas.

Por otra parte, en el numeral 2.4, usando los resultados obtenidos, se formula una matriz DOFA que servirá como herramienta a la toma de decisión, recomendando cuál de las metodologías estudiadas pueden ser usadas para complementar la metodología propuesta por el IDEAM y/o por el contrario defina si esta no presenta falencias en su formulación.

En el Capítulo cuatro (4), se aplicó la metodología obtenida en un caso de estudio (Cuenca del Curo) y se discuten los cálculos encontrados.

Finalmente, en el Capítulo cinco (5) se presentan los resultados obtenidos al aplicar los resultados de la DOFA con lo arrojado en el estudio de caso: se generan conclusiones y recomendaciones.

ANTECEDENTES

Colombia, es considerado el cuarto país en el mundo por su disponibilidad hídrica, actualmente enfrenta un conflicto por el uso del espacio para su desarrollo socioeconómico y para la protección de la oferta hídrica natural. El crecimiento poblacional de la nación ha congregado la demanda hídrica en regiones de escasa oferta del líquido, lo cual ha generado una fuerte presión sobre este recurso, que ya registra altos requerimientos para mantener la estructura socioeconómica instalada. Por estas razones, desde 1998 el IDEAM, con el fin de mantener un seguimiento sobre esta problemática realiza y actualiza el Estudio Nacional del Agua (ENA); síntesis de los recursos hídricos de Colombia con base en la relación oferta-demanda de agua (IDEAM, 2004).

En este sentido, es importante para las labores de planificación sostenible del recurso conocer la cantidad de agua disponible ofrecida por la fuente, los niveles de demanda y las restricciones de uso necesarias para mantener la salud de la fuente abastecedora. Además de ofrecer agua para consumo humano y abastecimiento de las actividades productivas, es necesario que la corriente mantenga de manera permanente un remanente de agua para atender otros bienes y servicios ambientales ofrecidos por la corriente como suministro de agua de los ecosistemas asociados, albergue de la biodiversidad acuática y recreación, entre otros. (Dominguez Calle, Costa Posada , Gonzalo Rivera, & Vanegas Sarmiento , 2005)

Por lo anterior, se formula la siguiente pregunta:

¿La metodología para calcular el índice de escasez estima acertadamente la relación porcentual de la demanda del conjunto de actividades económicas y sociales con la oferta hídrica disponible?

Las respuestas a este cuestionamiento son múltiples cuando se trata de estudiar la oferta y la demanda de recursos hídricos para las cuencas del país. En este sentido del IDEAM apunta al cálculo de un indicador, que permitirá establecer estrategias para la toma de decisiones referente a la escasez del recurso. Por lo tanto, el desarrollo de herramientas idóneas, que permitan estudiar este tipo de situaciones, se torna absolutamente necesario.

Es por eso que se formula el presente trabajo, con el objetivo de conceptualizar y comparar las metodologías que emplean otros países para la estimación del índice de escasez. Así mismo, permitirá establecer si la metodología que utiliza el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) es confiable para el cálculo de parámetro del índice de escasez o resulta un método limitado para definir la oferta y demanda del recurso hídrico en el país.

Actualmente el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM formulo la resolución 865 de 2004 “Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones”, cuya utilización es específica en la planeación recursos hídricos en cuencas.

Esta herramienta ha cobrado en la última década gran importancia, como guía de ayuda a la toma de decisiones, específicamente las relacionadas con las políticas necesarias para el sostenimiento de la oferta de agua en una cuenca.

En el ámbito internacional, la temática de índice de escasez y todo lo que ella reviste (conceptualización, métodos de cálculo, enfoques de clasificación, experiencias de determinación, normatividad, investigación, etc.), se describe muy ordenada en la revista *The Sustainability Consortium de la Universidad de Arkansas 2011*, por el autor (Brown & Matlock, 2011) donde se muestra una relación de las metodologías para el cálculo de índices para evaluar cuantitativamente la vulnerabilidad de los recurso agua (por ejemplo, escasez de agua o estrés hídrico), revisión que proporciona una visión general de los índices de escasez de agua y de las metodologías de evaluación de recursos a la vanguardia de la toma de decisiones políticas y corporativas. Entre las metodologías que menciona el documento resaltan: (*The Falkenmark Indicator*, desarrollada en 1989 por la profesora Malin Falkenmark; *Basic Human Water Requirements*, desarrollado por el profesor Peter Gleick, en 1996 y *The Watershed Sustainability Index*, desarrollado por los profesores Chavez and Alipaz en 2007. Metodologías que se describen en el Capítulo 2 del presente documento.

En el año 2017 se publica el artículo *The measurement of water scarcity: Defining a meaningful indicator*, elaborado por los profesores (Damkjaer & Taylor, 2017). Donde se

resumen metodologías de medición de escasez de agua y de estrés hídrico y expresa su punto de vista en la evaluación actual de los indicadores del recurso hídrico.

A nivel nacional, el IDEAM formulo para el 2014 el último estudio nacional de agua ENA-2014, el cual surge por la necesidad urgente de conocer y estudiar la riqueza en agua del país, su uso y las medidas de protección de este elemento valioso y profundizar en esto más allá de los intereses sectoriales. Entrega al país este documento misional que de manera periódica da cuenta del estado y dinámica del agua y los recursos hídricos en Colombia. Refleja en su contenido la integración de los diferentes componentes que conforman la base de información y conocimiento del ciclo hidrológico en sus dimensiones tanto de régimen natural como de régimen intervenido que se expresa en presiones por uso y afectaciones por actividades antrópicas. (Instituto de Hidrología M. y., 2015).

En este documento entrega los resultados de los cálculos a los siguientes grupos de indicadores:

1. Indicadores del Sistema hídrico (Índice de retención y regulación hídrica – IRH e Índice de aridez IA).
2. Indicadores de intervención Antrópica (Indicadores de presión por uso de agua, Indicadores de estado, de calidad y presión por contaminación y finalmente el indicador de Indicador de vulnerabilidad).

Durante el desarrollo del documento se entregarán el análisis a estos indicadores tanto internacionales como nacionales.

Por otra parte, se encontró que la metodología implementada por el IDEAM en el año 2005 para la estimación del índice de escasez mediante la resolución colombiana 865 de 2004 ha presentado revisiones técnicas en cuanto a su formulación. Es el caso de los artículos y tesis que se listan a continuación:

Artículo 1. “*Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano*” elaborador en 2008 por los profesionales (Domínguez, Rivera, Vanegas, & Moreno, 2008).

Artículo 2. “*Ajuste metodológico al índice de escasez de agua propuesto por el IDEAM en el plan de ordenación y manejo de la cuenca del río pamplonita, Norte de Santander, Colombia*” elaborado en 2008 por los profesionales (Infante Romero & Ortiz, 2008).

Artículo 3. *“Índices de escasez y de calidad del agua para la priorización de cuerpos de agua en los planes de ordenación del recurso hídrico. aplicación en la jurisdicción de Corantioquia”* elaborado en 2011 por los profesionales (Jaramillo Rojas, Molina, & Betancur, 2011).

Documento tesis 4: *“Análisis detallado de conceptualización de sequías y metodologías para la definición de índice de escasez: Caso Cuenca Río Sumapaz”* elaborado en 2015 por la estudiante Laura Patricia Torres Rojas (Torres Rojas, 2015)

OBJETIVOS

A continuación, se relacionan el objetivo general y los objetivos específicos:

OBJETIVO GENERAL

- Analizar y comparar las metodologías para determinar el índice de escasez de agua superficial y con base en él, proponer una metodología para el cálculo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las metodologías que se utilizan internacionalmente para definir el índice de escasez.
- Describir la metodología que utiliza el IDEAM para definir el índice de escasez en Colombia (Resolución 865 de 2004).
- Comparar la metodología de cálculo de índice de escasez en Colombia con otras empleadas internacionalmente.
- Realizar un estudio crítico de las diferentes metodologías mediante un análisis DOFA, con el propósito de formular una metodología para calcular el índice de escasez y una guía práctica para su obtención.
- Aplicar la metodología seleccionada sobre el caso de estudio: cuenca del río el Curo, del municipio de Gachetá, Cundinamarca.

CAPITULO 1

MARCO CONCEPTUAL Y LEGAL

A continuación, se relacionan los conceptos más importantes para tener en cuenta al momento de realizar la lectura del presente documento.

1.1 MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se definen los principales conceptos usados para el presente trabajo.

1.1.1 Caudal

El caudal de un río es el volumen de agua que pasa por una sección dada, en un tiempo determinado. Generalmente, se expresa en metros cúbicos por segundo (m^3/seg).

1.1.2 Caudal medio

“El caudal medio o aporte de un río, es calculado como la media aritmética de las series de datos de caudal, este concepto depende en gran medida de la disponibilidad de información”. (IDEAM, 2004)

1.1.3 Precipitación

“Es el volumen de agua que cae por acción de la gravedad sobre la superficie terrestre en forma de lluvia, llovizna, nieve o granizo procedentes de la condensación del vapor de agua”. (Instituto de Hidrología M. y., 2008)

1.1.4 Evapotranspiración

“Cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas”. (IDEAM, 2004)

1.1.5 Oferta hídrica superficial

Se refiere al volumen de agua continental, almacenada en los cuerpos de agua superficiales en un periodo determinado de tiempo.

1.1.6 Caudal ecológico

Un caudal ecológico es el “caudal mínimo de una corriente para mantener el hábitat y su entorno en buenas condiciones, considerando las necesidades de las poblaciones humanas, animales y vegetales, así como los requerimientos físicos para mantener su estabilidad y cumplir sus funciones tales como la de flujo de dilución, capacidad de conducción de sólidos, recarga de acuíferos, mantenimiento de las características estéticas y paisajísticas del medio.

Además, un caudal mínimo es el que debe mantenerse en un curso fluvial al construir una presa, en la captación o derivación, de forma que no se alteren las condiciones naturales del biotopo y se garantice el desarrollo de una vida fluvial igual a la que existía anteriormente”. (Parques Nacionales naturales de Colombia, 2018)

1.1.7 Escurrimiento superficial

Flujo superficial se define como parte de la precipitación que fluye por la superficie del suelo y se concentra en los cauces y cuerpos de agua. Es la lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje, es decir, la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. En el balance hídrico se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real y la infiltración en suelo; está en función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación de la cuenca, y está íntimamente ligada a la relación entre aguas superficiales y subterráneas de la cuenca. (Instituto de Hidrología M. y., 2010)

1.1.8 Infiltración

Es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo, a través de la superficie de la tierra, y queda retenida por ella o alcanza un nivel acuífero incrementando el volumen acumulado anteriormente. Superada por la capacidad de campo del suelo, el agua desciende por la acción conjunta de las fuerzas capilares y de la gravedad. Esta parte del proceso recibe distintas denominaciones, como: percolación, infiltración eficaz, infiltración profunda, etc. (Aparicio, 1999)

1.1.9 Cuenca hidrográfica

Recurso hídrico comprendido en un área física geográfica debidamente delimitada, en donde las aguas superficiales y subterráneas vierten a una red natural. También, son territorios bañados por un río y sus afluentes, así como el mismo curso fluvial. Para efectos de planificación, ordenamiento y gestión ambiental, la cuenca es una unidad de territorio donde las aguas fluyen naturalmente en un sistema interconectado y en el cual interactúan uno o varios elementos biofísicos, socioeconómicos y culturales. (Parques Nacionales naturales de Colombia, 2018).

1.1.10 Microcuenca

Es una unidad física determinada por la línea divisoria de las aguas que delimita los puntos desde los cuales toda el agua escurre hacia el fondo de un mismo valle, río, arroyo o vegas. Al unirse el caudal y superficie drenada de varias microcuencas, se conforman las cuencas hidrográficas de mayor tamaño

1.1.11 Demanda hídrica

“La demanda hídrica, se define como la extracción hídrica del sistema natural destinada a suplir las necesidades o requerimientos del consumo humano, la producción sectorial y las demandas esenciales de los ecosistemas no antrópicos”. (Instituto de Hidrología M. y., 2010)

1.1.12 Uso Consultivo

“Son aquellos que consumen o extraen el agua de su fuente de origen, por lo que en general este se puede medir cuantitativamente”. (Allen, Perrier, & Pereira, 1994)

1.1.13 Uso no consuntivo

Usos que no pueden ser medidos cuantitativamente, porque el agua es usada, pero no es removida de su ambiente natural. Sin embargo, estos usos pueden ser descritos por ciertas características del agua o por los beneficios que proporcionan al ecosistema. Los distintos tipos de usos no-consuntivos también se pueden clasificar en: Generación de energía hidroeléctrica,

Transporte, Pesca, Vida silvestre, Recreación y Receptores de residuos (Allen, Perrier, & Pereira, 1994).

1.1.14 Uso doméstico

“Cantidad de agua consumida por la población urbana y rural para suplir sus necesidades”. (IDEAM, 2004)

1.1.15 Uso industrial

“Es la cantidad de agua consumida por los diferentes sectores de la industria manufacturera y extractiva”. (IDEAM, 2004)

1.1.16 Uso del sector de servicios

“Es la cantidad de agua consumida por el sector servicios que incluye: comercio, transporte y almacenamiento”. (IDEAM, 2004)

1.1.17 Uso agrícola

“La principal fuente de agua para la agricultura es la precipitación, los volúmenes adicionales necesarios para el desarrollo de cultivos, deben ser previstos por sistemas de riego”. (IDEAM, 2004)

1.1.18 Coeficiente de cultivo (kc)

Representa la evapotranspiración de un cultivo en condiciones óptimas para producir máximos rendimientos. Los principales factores que inciden en el valor del coeficiente de cultivo son el tipo de cultivo, las fechas de siembra, el ritmo de desarrollo del cultivo, la duración del período vegetativo y las condiciones climáticas. (IDEAM, 2004)

1.1.19 Uso pecuario

Es el resultado de multiplicar el volumen de producción de animales de importancia comercial, por un factor de consumo promedio aproximado, el cual está determinado teniendo en cuenta el tipo de animal, el tipo de producción y el consumo de materia seca y alimento requerido. (IDEAM, 2004)

1.1.20 Escasez

“La escasez de agua, que puede entenderse ampliamente como la falta de acceso a cantidades adecuadas de agua para usos humanos y ambientales, es cada vez más reconocida en muchos países como una preocupación seria y creciente”. (White, Allendes, & Wyrwoll, 2014)

1.1.21 Índice de escasez

Este índice fue construido a partir de las relaciones de presión sobre el recurso hídrico presentadas en la Evaluación General de los Recursos de Agua Dulce del Mundo (UN-Consejo Económico y Social, 1997), allí se propone que existe escasez de agua cuando la cantidad de agua tomada de las fuentes es tan grande que se suscitan conflictos entre el abastecimiento de agua para las necesidades humanas, las ecosistémicas, las de los sistemas de producción y las de las demandas hídricas proyectadas hacia el futuro inmediato. (Domínguez, Rivera, Vanegas, & Moreno, 2008)

Se puede definir como un desequilibrio permanente que ocurre por el uso excesivo de los recursos hídricos. Lo anterior implica que el consumo de agua resulta siendo superior que la disponibilidad natural renovable. Este tipo de eventos puede verse agravados por la contaminación hídrica y ocurrencia de sequías. (Schmidt & Benitez, 2013)

Estos serían los principales elementos que definen el termino de índice de escasez, tomados del artículo (Schmidt & Benitez, 2013).

1. Causa: Debido a un uso excesivo de los recursos hídricos, causado por el consumo (del hombre) que se vuelve significativamente más alto que la disponibilidad renovable natural, o la contaminación (lo que reduce la calidad para el uso del agua)
2. Impactos: Los impactos de ocurrencia, gravedad y duración del evento, así como la sensibilidad de los ecosistemas, la economía y la sociedad afectados. También están influenciados por la humedad relativa de los suelos, la capacidad de almacenamiento para las aguas subterráneas y el flujo de las aguas superficiales.

Cuando se producen en áreas que ya son escasas en agua, las sequías tienen los efectos más severos.

3. Previsibilidad: La escasez de agua es predecible a mediano y largo plazo en el marco de los planes hidrológicos si se ha compilado información adecuada sobre la disponibilidad y el consumo de agua y las tendencias, y teniendo en cuenta la incertidumbre, por ejemplo, de las predicciones del cambio climático.
4. Umbrales ambientales: La escasez de agua generalmente afecta el estado ecológico de los ecosistemas dependiendo de la duración, la relevancia y la sensibilidad del ecosistema (incluidas las funciones y los elementos).
5. Posibles medidas para prevenir o mitigar los efectos: Planes hidrológicos, gestión del agua, medición y asignación, gestión de la demanda de agua, aumento de la eficiencia y reutilización del agua, protección de especies y hábitats vulnerables, políticas de precios, etc.

El índice de escasez como indicador para la gestión del recurso hídrico puede ser implementado en una diversa gama de dominios espaciales, desde al tramo de un río, a una cuenca, a una región hidrológica, a un municipio e incluso al territorio de una nación. Este índice es aplicable a todo aquel territorio en el que se puedan valorar todas las entradas y salidas de aguas superficiales. En casos particulares el índice de escasez puede ser evaluado en sistemas de abastecimiento en los que sus fuentes abastecedoras pueden ser inconexas entre sí, pero en los cuales los elementos de entrada y salida de agua potencialmente aprovechable pueden ser cuantificados. (Instituto de Hidrología M. y., 2008).

1.1.22 Balance oferta – demanda de agua

Este parámetro representado por la diferencia en el tiempo, entre la oferta del recurso y la demanda según su uso, permite identificar acciones y proyectos. Si el balance es positivo, existe la posibilidad de disponer de excedentes de una zona a otra que lo requiera. El balance negativo implica un déficit y por tanto es necesario plantear soluciones. (IDEAM, 2004)

1.2 MARCO LEGAL

A continuación, se relacionan las normas más representativas para el presente trabajo.

1.2.1 Constitución política de Colombia de 1991

Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La Ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines. Artículo 8. Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación.

1.2.2 Ley 99 de 1993

Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.

1.2.3 Decreto 1541 de 1978

Por el cual se reglamenta el Código Nacional de los Recursos Naturales (Ley 2811 de 1974). Marco regulatorio en lo relacionado al proceso de reglamentación de los usos del agua. El capítulo I “Reglamentación del uso de las aguas” se establecen las etapas que se deben seguir para cumplir legalmente con el proceso.

1.2.4 Decreto 2857 de 1981

Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto- Ley 2811 de 1974 sobre Cuencas Hidrográficas y se dictan otras disposiciones. Artículo 3.- Condiciones del aprovechamiento. El aprovechamiento de los recursos naturales y demás elementos ambientales se realizarán con sujeción a los principios generales establecidos por el Decreto-ley 2811 de 1974 y, de manera especial, a los criterios y previsiones del artículo 9 del mismo estatuto.

1.2.5 Decreto 1900 de 2006

Por el cual se establece que todo proyecto que involucre en su ejecución el uso del agua tomada directamente de fuentes naturales y que esté sujeto a la obtención de licencia ambiental, deberá destinar el 1% del total de la inversión para la recuperación, conservación, preservación y vigilancia de la cuenca hidrográfica que alimenta la respectiva fuente hídrica; de conformidad con el parágrafo del artículo 43 de la Ley 99 de 1993.

1.2.6 Decreto 1323 de 2007

Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH).

1.2.7 Decreto 1640 de 2012

Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. Artículo 57. De la selección y priorización. La Autoridad Ambiental competente, elaborará El Plan de Manejo Ambiental de la Microcuenca, previa selección y priorización de la misma, cuando se presenten o se prevean como mínimo una de las siguientes condiciones, en relación con oferta, demanda y calidad hídrica, riesgo y gobernabilidad:

1. Desequilibrios físicos, químicos o ecológicos del medio natural derivados del aprovechamiento de sus recursos naturales renovables.
2. Degradación de las aguas o de los suelos y en general de los recursos naturales renovables, en su calidad y cantidad, que pueda hacerlos inadecuados para satisfacer los requerimientos del desarrollo sostenible de la comunidad asentada en la microcuenca.
3. Amenazas, vulnerabilidad y riesgos ambientales que puedan afectar los servicios ecosistémicos de la microcuenca, y la calidad de vida de sus habitantes. Cuando la microcuenca sea fuente abastecedora de acueductos y se prevea afectación de la fuente por fenómenos antrópicos o naturales.

1.2.8 Decreto 0953 de 2013

Por el cual se reglamenta el artículo 111 de la Ley 99 de 1993 modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011. Artículo 4. Identificación, delimitación y priorización de las áreas de importancia estratégica. Para efectos de la adquisición de predios o la implementación de esquemas de pago por servicios ambientales por parte de las entidades territoriales, las autoridades ambientales deberán previamente identificar, delimitar y

priorizar las áreas de importancia estratégica, con base en la información contenida en los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas, planes de manejo ambiental de microcuencas, planes de manejo ambiental de acuíferos o en otros instrumentos de planificación ambiental relacionados con el recurso hídrico. En ausencia de los instrumentos de planificación de que trata el presente artículo o cuando en estos no se hayan identificado, delimitado y priorizado las áreas de importancia estratégica, la entidad territorial deberá solicitar a la autoridad ambiental competente que identifique, delimite y priorice dichas áreas.

1.2.9 Resolución 1096 de 2000

Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).

1.2.10 Resolución 865 de 2004

Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones

1.2.11 Resolución 872 de 2006

Por la cual se establece la metodología para el cálculo del Índice de escasez para aguas subterráneas a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.

1.2.12 Resolución 330 de 2017

Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) y se derogan las Resoluciones números 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

A continuación, se relaciona el significado del término escasez y se listan los métodos creados por varios autores para el cálculo del indicador de escasez.

2.1 ESCASEZ

La escasez de agua, que puede entenderse ampliamente como la falta de acceso a cantidades adecuadas de agua para usos humanos y ambientales, es cada vez más reconocida en muchos países como una preocupación seria y creciente. En consecuencia, los medios de comunicación, los informes gubernamentales, las organizaciones no gubernamentales, las organizaciones internacionales como la ONU y la OCDE, así como la literatura académica, utilizan regularmente el término «escasez de agua» para destacar las zonas en las que los recursos hídricos están bajo presión. (White, Allendes, & Wyrwoll, 2014)

Sin embargo, a pesar de su uso frecuente, no hay consenso sobre cómo debe definirse la escasez de agua o cómo debe medirse. Por lo tanto, una referencia a la escasez de agua en un informe puede medir algo diferente a otros informes que utilizan el mismo término. Esto puede crear confusión en cuanto a lo que significa exactamente la escasez de agua y conducir a respuestas diferentes a la pregunta de qué regiones están bajo el estrés hídrico. (White, Allendes, & Wyrwoll, 2014). De acuerdo con lo anterior, en los últimos 20 años, se han desarrollado un número importante de índices que buscan evaluar cuantitativamente la vulnerabilidad (como escasez o tensión sobre el recurso hídrico) de los recursos hídricos en una región determinada. La principal dificultad que se presenta al caracterizar el estrés hídrico es el gran número de aspectos, igualmente importantes, relacionados con uso, suministro y escasez del agua; de esta forma, seleccionar el criterio de evaluación puede ser tanto una decisión política como científica. (Brown & Matlock, 2011).

“En términos generales, la clasificación de la escasez puede realizarse de acuerdo con aspecto que considera. De esta forma, los índices empleados en la cuantificación pueden enfocarse en los siguientes tres índices relacionados”. (Brown & Matlock, 2011).

- Requerimientos de agua de seres humanos.
- Vulnerabilidad de recursos hídricos.
- Requerimientos ambientales de agua.

A continuación, se listan los métodos creados por varios autores para el cálculo del indicador de escasez. Así mismo se complementa la información entregada por el autor y se concluye acerca de su uso y ventajas y desventajas que proporciona la metodología.

2.1.1 Requerimientos de agua de los seres humanos.

En los índices que se presentaran a continuación, la escasez de agua, en general, se describe como una función de los recursos hídricos disponibles y la población humana. Los valores que se obtienen son, comúnmente, expresados en términos de agua al año y son hallados para escalas espaciales nacionales (Brown & Matlock, 2011).

Dentro de la investigación se evidenció que son varios los métodos empleados para estimar la escasez haciendo uso de los requerimientos de los seres humanos, dentro de los que se resaltan: el Índice de Falkenmark, Índice de requerimientos humanos básicos de agua, Índice de estrés hídrico social, índice de pobreza de agua, índice de escasez relativa de agua, índice de estrés social del agua, y el índice caudal de la estación seca. Estos indicadores miden los recursos hídricos basados en los requerimientos humanos de agua y la disponibilidad de agua por medio de la asignación de un rango de escasez. Dicha asignación de rango indica el nivel de escasez de la zona. Sin embargo, estas metodologías son de gran ayuda para hacer una evaluación rápidamente de la zona y su contexto, teniendo en cuenta un cálculo de la oferta y la demanda específicamente de los requerimientos “básicos” de agua para el ser humano, más no de los requerimientos de agua para los usos industrial, agrícola, ambiental, etc. Es decir que estas metodologías solamente servirán como referencia y no se utilizaran al momento de comparación de las demás metodologías que propone el presente trabajo.

A modo de referencia se presentan una explicación del método propuesto por la profesora Falkenmark.

2.1.1.1 Índice de Falkenmark

El índice de Falkenmark es, quizás, el más empleado en la medición de la tensión sobre el recurso hídrico en escalas nacionales. Puede ser definido como la fracción del recurso hídrico renovable disponible para uso humano y, en general, se expresa en unidades de metro cúbico al año. Basado en ese valor, es posible categorizar un área determinada como no estresada, estresada, con escasez y con escasez absoluta. Los umbrales del índice de 1.700 m³ y 1000 m³ por año son utilizados como los umbrales entre áreas con estrés hídrico y áreas escasas, respectivamente (Brown & Matlock, 2011).

Los límites establecidos por el método se presentan a continuación:

Tabla 1 Clasificación de escasez índice de Falkenmark y WTA

Indicador Falkenmark (m³/año)	Indicador WTA (Demanda/Ofertar)	Categoría
>1700	<10%	No estresada
1000-1700	10-20%	Estresada
500-1000	20-40%	Con escasez
<500	>40%	Con escasez absoluta

Fuente: (Brown & Matlock, 2011)

2.1.2 Vulnerabilidad del recurso hídrico

Estos indicadores, además de establecer unos rangos numéricos que estiman si la zona tiene problemas de escasez, también tienen en cuenta el cálculo la demanda de agua de los sectores agrícola, industrial, domésticos y ambiental. Además de tener en cuenta la capacidad de adaptación de una sociedad para hacer frente a la escasez y la sostenibilidad ambiental asociada al uso de agua dulce.

Ñ2

A continuación, se relación los principales métodos para establecer la escasez teniendo en cuenta la clasificación de vulnerabilidad del recurso hídrico. Dentro de los cuales se resaltan:

2.1.2.1 Índice relativo local de uso y reusó de agua (WTA)

La relación WTA fue utilizada en la evaluación de la disponibilidad hídrica que incorporó herramientas geoespaciales junto con entradas climáticas (Vorosmarty, Douglas, Green, & Revenga, 2005). Un área definida se dividió en celdas de 8 kilómetros (n celdas para la notación que se presenta más adelante) y, para cada una de ellas, se calculó un índice de uso, así como de reusó. El uso (demanda) de agua se estimó con base al producto del consumo doméstico (D), industrial (I) y agrícola (A). La descarga generada (oferta) se calculó como el producto entre la escorrentía generada localmente y el área de la celda. De esta forma, el caudal (oferta) que corre por el río resulta siendo la suma de todas las descargas locales (Q_c).

Para el cálculo del (índice de uso), el uso (demanda) del agua en la celda (n) se dividió en el caudal transportado (oferta). Esto para una sola celda.

$$\text{Índice de uso}_n = \frac{DIA_n}{Q_{cn}}$$

El índice de reusó se estimó como el cociente entre el uso total (demanda: (D+I+A)) de agua de todas las celdas (n) en el caudal transportado. Esto para todas las celdas.

$$\text{Índice de reuso} = \frac{\sum DIA_n}{Q_{cn}}$$

“Cuando se tienen índices de uso, para celdas dadas, mayores que 40% se considera que se tiene un alto grado de estrés hídrico” (Brown & Matlock, 2011).

“Realizado a escala nacional, un país se considera "estresado por el agua" si los retiros anuales están entre 20% y 40% de suministro anual de agua dulce y "severamente estresado" si esta cifra excede el 40%” (ver Tabla 1). (Rijsberman, 2004)

Los indicadores de uso y de reusó, maneja el mismo principio de cálculo que presenta la metodología reportada en el Manual “The Water Footprint Assessment - Setting the Global Standard” publicado en el año 2011 por la Red de Huella Hídrica (Water Footprint Network). En esta publicación se habla de los términos de “Índice de escasez de agua azul y verde”.

Igualmente se encontró que este indicador maneja el mismo principio de cálculo para el Estudio Nacional de Agua (ENA) 2014, nombrado en este estudio como “Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas (IPHE)” y el Índice de Agua no Retornada a la Cuenca (IARC) respetivamente.

2.1.2.2 *Índice de sostenibilidad de la cuenca*

En 2007, (Chaves & Alipaz , 2007), propusieron este índice que incorpora aspectos hidrológicos, ambientales, de vida y políticos. Cada uno de los anteriores, involucra parámetros de presión, estado y repuesta. “El índice es específico para cada cuenca y está diseñado para áreas máximas de 2500 km²; áreas más grandes deben ser divididas en secciones más pequeñas” (Brown & Matlock, 2011)

$$WSI = \frac{H + E + L + P}{4}$$

El rango de valores del indicador está entre 0 y 1 y se halla como el promedio de cuatro indicadores: El indicador hidrológico (H), el indicador ambiental (E), el indicador de vida o humano (H) y el indicador político (P). A cada uno de los parámetros se le da un puntaje de 0, 0.25, 0.5, 0.75 o 1.0. Todos los indicadores son iguales en peso a pesar de que los parámetros pueden variar entre cuencas y deben ser elegidos por consenso entre los encargados del manejo. (Chaves & Alipaz , 2007). Los parámetros de presión del índice, así como los de estado, niveles y puntajes están claramente definidos y tabulados permitiendo, a quien realice el cálculo, elegir el mejor posible puntaje para cada parámetro. Las siguientes tablas presentan los indicadores y parámetros del índice, así como los niveles y valores de estos. Finalmente, se presenta la ecuación para el cálculo del índice: (Brown & Matlock, 2011)

Tabla 2 Indicadores y parámetros

	Presión	Estado	Respuesta
Indicadores	Parámetros		
H	-Variación porcentual de la disponibilidad de agua per cápita de la cuenca de los últimos 5 años. -Variación del DBO5 de la cuenca en los últimos 5 años.	-Disponibilidad per cápita de agua de la cuenca. -DBO5 de la cuenca (promedio per cápita)	-Mejora en la eficiencia del uso del agua (últimos 5 años). -Mejora en tratamiento de alcantarillado/ disposición (últimos 5 años)
E	Índice de presión ambiental (EPI) de la cuenca	Porcentaje del área de la cuenca con vegetación natural	Evolución en conservación de la cuenca (áreas protegidas)
L	Variación en PIB per cápita de la cuenca en los últimos 5 años	Índice de desarrollo humano (HDI) para la cuenca (dando peso de acuerdo a la población del país)	Evolución del Índice de Desarrollo Humano (HDI) de la cuenca e los últimos 5 años
P	Variación en el Índice de Desarrollo Humano (HDI) relacionado con la educación en los últimos 5 años	Capacidad institucional de la cuenca en manejo de recursos hídricos (WRM)	Evolución de los gastos en WRM de la cuenca de los últimos 5 años.

Fuente: (Torres Rojas, 2015)

Tabla 3 Descripción de los parámetros de presión, niveles y valores

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Valor
Hidrología	$\Delta 1$ = Variación porcentual en la disponibilidad per cápita de la cuenca en los últimos 5 años (m^3 /personal año)	$\Delta 1 < -20\%$	0,00
		$-20\% < \Delta 1 < -10\%$	0,25
		$-10\% < \Delta 1 < 0\%$	0,50
		$0\% < \Delta 1 < +10\%$	0,75
		$\Delta 1 > +10\%$	1.00
	$\Delta 2$ = Variación porcentual en la DBO ₅ de la cuenca en los últimos 5 años	$\Delta 2 > 20\%$	0,00
		$20\% > \Delta 2 > 10\%$	0,25
		$0 < \Delta 2 < 10\%$	0,50
		$-10\% < \Delta 2 < 0\%$	0,75
		$\Delta 2 < -10\%$	1
Ambiental	Índice de presión ambiental (EPI) de la cuenca (rural y urbana)	$EPI > 20\%$	0,00
		$20\% < EPI < 10\%$	0,25

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Valor
		10%<EPI<5%	0,50
		5%<EPI<0%	0,75
		EPI <0%	1,00
Vida/Humano	Variación en el Índice de Desarrollo Humano (HDI) en los últimos 5 años	$\Delta < -20\%$	0,00
		$-20\% < \Delta < -10\%$	0,25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,50
		$0\% < \Delta < +10\%$	0,75
		$\Delta > +10\%$	1,00
Política	Variación en el Índice de Desarrollo Humano (HDI) en educación en los últimos 5 años	$\Delta < -20\%$	0,00
		$-20\% < \Delta < -10\%$	0,25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,50
		$0\% < \Delta < +10\%$	0,75
		$\Delta > +10\%$	1,00

Fuente: (Brown & Matlock, 2011)

Tabla 4 Descripción de los parámetros de estado, niveles y valores

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Valor
Hidrología	Disponibilidad per cápita (WA) de la cuenca (m ³ /personal año)	WA < 1700	0,00
		1700 < WA < 3400	0,25
		3400 < WA < 5100	0,50
		5100 < WA < 6800	0,75
		6800 > WA	1,00
	DBO ₅ promedio de la cuenca (mg/L)	DBO ₅ > 10	0,00
		10 < DBO ₅ > 5	0,25
		5 < DBO ₅ > 3	0,50
		3 < DBO ₅ < 1	0,75
		DBO ₅ < 1	1,00
Ambiental	% del área de la cuenca con vegetación natural (AV)	Av < 5	0,00
		5 < Av < 10	0,25
		10 < Av < 25	0,50
		25 < Av < 40	0,75
		Av > 40	1,00
Vida/Humano		HDI < 0.5	0,00

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Valor
	Índice de Desarrollo Humano (HDI) para la cuenca (dando peso de acuerdo con la población del país)	0.5<HDI<0.6	0,25
		0.6<HDI<0.75	0,50
		0.75< Δ <0.9	0,75
		HDI>0.9	1,00
Política	Capacidad institucional de la cuenca en manejo de recursos hídricos (IWRM).	Muy Pobre	0,00
		Pobre	0,25
		Media	0,5
		Buena	0,75
		Excelente	1

Fuente: (Brown & Matlock, 2011)

Tabla 5 Descripción de los parámetros de respuesta, niveles y valores

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Valor
Hidrología	Mejora en la eficiencia del uso del agua (últimos 5 años)	Pobre	0,25
		Media	0,5
		Buena	0,75
		Excelente	1
	Mejora en tratamiento de alcantarillado / disposición (últimos 5 años)	Pobre	0,25
		Media	0,5
		Buena	0,75
		Excelente	1
Ambiental	Evolución en conservación de la cuenca (áreas protegidas) en últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75
		$10\% < \Delta$	1
Vida/Humano	Evolución del Índice de Desarrollo Humano (HDI) de la cuenca en los últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75
		$10\% < \Delta$	1
Política	Evolución de los gastos en la Capacidad institucional de la cuenca en manejo de recursos hídricos (WRM) de la cuenca en los últimos 5 años.	$\Delta < -10\%$	0,25
		$-10\% < \Delta < 0\%$	0,5
		$0\% < \Delta < 10\%$	0,75
		$10\% < \Delta$	1

Fuente: (Torres Rojas, 2015)

Una vez obtenido el valor final del WSI, se podría considerar una sostenibilidad baja si WSI < 0.5; intermedia, si el rango varía entre 0.5 y 0.8, y alta si WSI > 0.8.

2.1.2.3 *Índice de disponibilidad de agua*

Este índice tiene en cuenta la variabilidad temporal de la disponibilidad del recurso hídrico. Este índice incluye aguas superficiales, así como aguas subterráneas y las compara con las demandas ejercidas por todos los sectores (doméstico, industrial y agricultura) (Meigh, McKenzie, & Sene, 1999).

Analiza la variabilidad temporal de la oferta de agua, incluyendo los recursos de agua superficial y de agua subterránea y comparándolas con las demandas de los sectores. Su valor se encuentra en el intervalo de -1 y 1. El cero se identifica como la igualdad entre la oferta y la demanda (Assimacopoulos, 2004).

El cálculo del índice se lleva a cabo de la siguiente forma:

$$WAI = \frac{R + G - D}{R + G + D}$$

Donde R representa la escorrentía superficial, G la oferta subterránea y D la suma de las demandas de todos los sectores. La disponibilidad superficial se estima como el 90% de la escorrentía segura y la disponibilidad de agua subterránea puede estimarse bien como un potencial de recarga calculado por un balance mensual de agua superficial o como el rendimiento potencial del acuífero (Assimacopoulos, 2004).

2.1.2.4 *Índice de escasez de agua*

Se define como un indicador que combina información sobre las extracciones de agua y la disponibilidad de recurso en una determinada zona (Heaps, Kemp-Benedict, & Raskin, 1998) añadieron la variable de recursos hídricos obtenidos a partir de desalinización a este indicador. A pesar de que el porcentaje de uso de agua desalinizada es mínimo a nivel mundial, es parte importante en algunas regiones, en especial, en Medio Oriente (en Emiratos

Árabes Unidos el porcentaje de agua desalinizada que se extrae anualmente es el 18% de la oferta hídrica total) (Assimacopoulos, 2004).

El cálculo de este índice se lleva a cabo de la siguiente manera:

$$IEA = \frac{W - S}{Q}$$

Donde

(W) son las extracciones anuales de agua, (demanda)

(S) son las aguas desalinizadas y

(Q) es el agua disponible anualmente. Se estima con la siguiente formula:

$$Q = R + \alpha \sum D_{up}$$

Donde

(R) son los recursos anuales internos (oferta de las fuentes hídricas)

(D_{up}) es la cantidad de agua externa (oferta del agua comprada)

(α) es el porcentaje de agua externa que puede ser utilizada.

Este último factor está influenciado por la calidad del agua transvasada, el consumo real de los recursos hídricos en la región aguas arriba y la accesibilidad del agua.

De acuerdo con lo anterior, la severidad de la tensión sobre el agua puede clasificarse como:

Tabla 6 Clasificación de estrés hídrico de acuerdo con el índice de escasez de agua

Rango	Clasificación
IEA<0.1	Sin estrés hídrico
0.1<IEA<0.2	Bajo estrés hídrico
0.2<IEA<0.4	Estrés hídrico moderado
IEA>0,4	Alto estrés hídrico

Fuente: (Brown & Matlock, 2011)

“Al igual que la mayoría de los índices, anteriormente presentados, este ignora las variaciones espaciales en la oferta, así como la información sobre la calidad del agua en la fuente” (Assimacopoulos, 2004).

2.1.3 Requerimientos ambientales de agua

“La conferencia de Dublín, sobre el agua y el desarrollo sostenible, en 1991 concluyó: "dado que el agua sostiene la vida, un manejo efectivo de los recursos hídricos requiere una aproximación holística que conecte el desarrollo social y económico con la protección a los ecosistemas naturales" (ICWE, 1992). (Sullivan , 2002) señaló que la escasez de agua dulce está asociada a la degradación de los ecosistemas. “El índice de escasez de agua propuesto incorpora la productividad del ecosistema, comunidad, salud humana y bienestar económico” (Vorosmarty, Douglas, Green, & Revenga, 2005). Sin embargo, este depende en gran medida de la valoración que se aplique a cada una de las variables mencionadas. (Brown & Matlock, 2011).

2.1.3.1 Índice de Estrés Hídrico (WSI)

Desarrollado por (Smakhtin, Revenga, & Doll, 2004), reconoce la importancia de requerimientos ambientales de agua como parámetros importantes en la determinación del agua disponible total de una región. La escurrentía media promedio (EMP) es utilizada como una aproximación de la disponibilidad total de agua y los requerimientos ambientales de agua (RAA), son expresados como un porcentaje de la escurrentía anual promedio, a largo plazo, del río que debe ser reservada con propósitos ecológicos (Brown & Matlock, 2011).

La evaluación de los requerimientos ambientales de agua (RAA) abarca desde métodos basados en objetivos hasta ejercicios más holísticos que pueden involucrar equipos interdisciplinarios que brindan un juicio experto. Las relaciones entre las diversas funciones de un sistema fluvial a menudo son difíciles de establecer con confianza y, en consecuencia, requieren juicios subjetivos debido a la falta de datos hidrológicos, biológicos y ecológicos confiables en países de bajos ingresos (Alcamo, Florke, & Marker, 2010).

“La forma de cálculo del índice se presenta a continuación, así como la clasificación establecida por (Smakhtin, Revenga, & Doll, 2004) para el mismo”:

$$WSI = \frac{\text{Extracciones}}{EMP - RAA} \approx WSI = \frac{\text{demanda}}{\text{oferta neta}}$$

Este índice puede no ser negativo, ya que los requerimientos ambientales de agua (RAA) siempre es menor que el total de agua disponible (EMP).

La escorrentía media promedio (EMP), que es el promedio de los volúmenes anuales totales de agua, registrados o calculados en un punto particular de un río durante un largo período. Por ejemplo, la suma del flujo anual medio a largo plazo de todos los ríos del mundo en sus salidas representaría el EMP del mundo. (Smakhtin, Revenga, & Doll, 2004)

Los requerimientos ambientales de agua (RAA), representan el flujo ecológico relacionado con la variabilidad del flujo del río, y se estiman mediante reglas conceptuales de la serie de tiempo de descarga simulada. Los requerimientos ambientales para mantener una condición equitativa de los ecosistemas de agua dulce varían globalmente entre el 20 al 50 por ciento del caudal medio anual del río en una cuenca. (Smakhtin, Revenga, & Doll, 2004).

Tabla 7 Clasificación de cuencas de acuerdo con WSI

WSI (proporción)	Grado de escasez de una cuenca
WSI >1	Sobreexplotación- Cuencas ambientalmente escasas
0.6 < WSI < 1	Altamente explotado - Cuencas ambientalmente estresadas
0.3 < WSI < 0.6	Moderadamente explotado
WSI < 0.3	Ligeramente explotado

Fuente: (Brown & Matlock, 2011)

A continuación, se relacionan las propuestas de autores a nivel mundial para medir el indicador de escasez. Analizando la metodología propuesta para el cálculo de la oferta, demanda y los rangos para ponderar el indicador.

2.2 FORMAS DE ESTIMAR EL ÍNDICE DE ESCASEZ A NIVEL MUNDIAL

Parte de la investigación es establecer e identificar las metodologías a nivel mundial que se implementaron para medir el indicador de escasez y como estas en ciertos países ha logrado grandes avances al momento de cuantificar la oferta y la demanda del recurso agua.

2.2.1 Estados Unidos

Metodologías desarrolladas por este país para la estimación del índice de escasez

2.2.1.1 Índice de Estrés de suministro de agua (WaSSI).

Se propuso un nuevo diseño para predecir factores antropogénicos y ambientales que afectan la escasez de agua. Se usa la información recolectada de cuenca hidrográfica dentro de la que se incluyen: (índices históricos de uso de agua y flujo de retorno por sectores, extracción de aguas subterráneas, clima histórico y proyectado, población y uso del suelo); esta información es usada para generar un Código de Unidad Hidrológica (HUC). Las categorías de la base de datos del U.S. Geological Survey (USGS) son: Comercial, Doméstica, Industrial, Irrigación, Ganadería, Minería y Termoeléctrica. (McNulty, Moore, & Cohen, 2010)

- Cálculo de la oferta.

$$WS = SS + GS + \sum RFi$$

Donde:

WS = Volumen total de suministro de agua (m³).

SS = "Suministro total de agua superficial para cada cuenca. Se estima en la escala de tiempo mensual utilizando un modelo de balance hídrico" (Zhou, y otros, 2008).

Este modelo hidrológico predice el rendimiento hídrico a nivel de cuenca en función de la evapotranspiración potencial mensual, el tipo de uso de la tierra, la capacidad de interceptación del dosel, la profundidad de enraizamiento de la planta, el contenido de humedad del suelo y la precipitación recibida.

GS = Suministro total de agua subterránea según lo representado por los registros de extracción de agua subterránea históricos del USGS.

RF = Flujo de retorno de cada uno de los siete usos del agua, incluidos los sectores comerciales, doméstico, industrial, de riego, ganadero, minero y termoeléctrico. La RF se calcula como la tasa de flujo de retorno (TFR) histórica del USGS multiplicada por el uso del agua (WU). Las tasas de flujo de retorno varían entre las cuencas hidrográficas y los sectores de uso de agua.

Los valores de RF se pueden obtener de la base de datos del sitio web “USGS – Science for a changing world” <https://water.usgs.gov/watuse/data/1990/index.html>.

- Cálculo de la demanda.

La demanda de agua (WD) representa la suma de todos los usos del agua (WU) por cada uno de los siete sectores (i), más uso público (PB) y pérdidas que representan transferencia de agua entre cuencas y la diferencia entre agua extraída y entregada (Solley, Pierce, & Perlman, 1998)

$$WD = \sum WUi + \sum PBi$$

El Índice de estrés del suministro de agua (WaSSI) se utiliza para evaluar cuantitativamente la magnitud relativa del suministro y la demanda de agua en el nivel de cuenca HUC.

$$WaSSI_x = \frac{WD_x}{WS_x}$$

Donde x representa el suministro de agua histórica o futura y la demanda de los sectores ambientales y antropogénicos. Una vez que se determinan los valores anuales del uso del agua, se aplica una función mensual para redistribuir el uso anual de agua a cada mes para cada región estudiada.

Al respecto es importante resaltar que el documento: Estimated Use of Water in the United States County and HUC8 Data, fue publicado en 1995 y compila datos de uso de agua para las siete actividades descritas en uso de agua, esta información se presenta por condado y unidades hidrológicas (cuencas hidrográficas). Para mayor información visitar el sitio web <https://water.usgs.gov/watuse/data/1990/index.html>

2.2.2 Canadá

Metodología aplicada para este país.

2.2.2.1 Índice Canadiense de Sostenibilidad del Agua (CWSI)

El Índice Canadiense de Sostenibilidad del Agua (CWSI) es un índice compuesto que evalúa el bienestar de las comunidades canadienses con respecto al agua dulce en una escala de 0 a 100.

“Los resultados de CWSI reflejan la sostenibilidad del agua de la comunidad. Cuanto más alto sea el puntaje CWSI de una comunidad, mejor calificado esta para disfrutar y mantener el nivel ambiental, socioeconómico y salud (calidad de agua)”. (Policy Research Institute, 2007)

Los resultados tienen una gama de aplicaciones y usos práctico, a continuación, se relación los más importantes. (Policy Research Institute, 2007)

1. Sensibilizar sobre el estado general del agua dulce;
2. Un medio transparente y estandarizado para comparar el estado del agua dulce en diferentes tipos de comunidades;
3. Monitorear el progreso hacia la gestión integrada de los recursos hídricos;
4. Identificar comunidades prioritarias con deficiencias de recurso agua;
5. Dirigir las inversiones a comunidades o necesidades específicas en una comunidad;
6. Compilación de datos e información.

El índice CWSI consta de cinco componentes y quince indicadores (ver Tabla 8). A estos últimos se le califica entre 0 y 100. Cuanto mayor sea el puntaje de cada indicador, más cerca estará la población de tener condiciones ideales.

Tabla 8 Lista de indicadores metodología CWSI

Índice canadiense de sostenibilidad del agua	Recurso	Disponibilidad	Volumen de agua disponible por persona
		Suministro	Vulnerabilidad del suministro, causadas por variaciones estacionales y/o agotando los recursos de agua subterránea
		Demanda	Demanda de agua versus la concesión de agua
	Salud de ecosistemas	Estrés	Cantidad de agua removida de los ecosistemas
		Calidad	Índice de calidad del agua para la protección de la vida acuática
		Pescado	Cultura y dependencia económica del consumo de peces
	Infraestructura	Demanda	Capacidad en la infraestructura física de los sistemas de acueducto y alcantarillado, con relación al crecimiento de la población.
		Condición	Condiciones físicas de las redes de acueducto y alcantarillado relacionadas con la cantidad de perdidas (AC) y de infiltraciones al suelo (ALC).
		Tratamiento	Nivel del tratamiento a las aguas residuales.
	Salud humana	Acceso	Cantidad de agua potable accesible por persona
		Confiabilidad	Continuidad del servicio por persona
		Impacto	Numero de enfermedades transmitidas por el uso del agua
	Capacidad	Financiero	Cantidad de recursos financieros, para la gestionar los recursos hídricos y responder a los desafíos locales
		Educación	Capacidad de la comunidad para gestionar los recursos hídricos y abordar los problemas locales del agua
		Formación	Capacitación a los fontaneros

Fuente: (Policy Research Institute, 2007)

Esta metodología se puede evaluar a diferentes escalas, puede ser aplicada a toda una cuenca hidrográfica o a un cuerpo de agua (Río, quebrada, aljibe). Este indicador evalúa la cantidad de agua dulce renovable (DISPONIBILIDAD), además de la oferta (SUMINISTRO) y el nivel actual de (DEMANDA) del recurso. Considera aguas superficiales y aguas subterráneas. Para el componente de Recursos, las variables se medirán a escala de cuenca fluvial. (Policy Research Institute, 2007)

El índice canadiense de disponibilidad de agua (CWSI) mide los recursos renovables de agua dulce utilizando los umbrales WSI como punto de referencia, de acuerdo con la metodología elaborada por Falkenmark para el indicar de estrés hídrico (ver Tabla 1).

“Los parámetros descritos por Falkenmark se utilizan como puntos de referencia para evaluar la disponibilidad de agua dulce renovable, donde se asigna un puntaje de 100 a cualquier valor superior a (1700 m³/año) y se asigna un puntaje de 0 a cualquier valor inferior a (500 m³/año)”. (Policy Research Institute, 2007)

Por lo tanto, se calcula una puntuación de la comunidad para este indicador (R_A) usando la siguiente ecuación:

$$R_A = \frac{(T_{cap} - 500)}{(1700 - 500)} * 100$$

Donde: T_{cap} = Recursos hídricos renovables totales (m³ / año)

Si $T_{cap} > 1700$, RA = 100

Si $T_{cap} < 500$, RA = 0

Para determinar el recurso hídrico renovable total, se utiliza el caudal medio anual de la cuenca, el rendimiento hídrico subterráneo sostenible o ambos, según los recursos hídricos de la cuenca.

A continuación, se relación las principales formulas usadas para usar los indicadores propuestos por esta metodología. Para más información consultar la bibliografía (Policy Research Institute, 2007).

- Suministro

Este indicador sirve para evaluar la vulnerabilidad del suministro de agua, al observar la variabilidad de los flujos de agua superficial y/o las tendencias en las reservas de agua subterránea. (Gleick, 1995) estableció la relación de escorrentía de agua para evaluar en qué medida varían los flujos de superficie. Según Gleick, un valor mayor a 3 indica vulnerabilidad. Para evaluar la variabilidad del flujo superficial (RSS) en la metodología CWSI, se plantea el siguiente cambio: Una escorrentía de 1 es igual a una puntuación de 100, 3 es igual a una puntuación de 50, y 5 es igual a una puntuación de 0. La puntuación de la comunidad se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_{ss} = 1 - \frac{(X-1)}{(5-1)} * 100$$

Donde (x) corresponde al valor de escorrentía.

Si $x < 1$, entonces $RSS = 100$

Si $x > 5$, entonces $RSS = 0$

Si $1 < x < 5$, entonces calcula RSS usando la fórmula anterior

Si los datos de escorrentía no están disponibles, usar los valores de medición de caudal de la fuente.

La vulnerabilidad del suministro de agua subterránea (RSG) se basa en la medida de caudal de los pozos. Observando cuántos pozos están aportando caudales crecientes, cuántos no muestran cambios y cuántos disminuyen su aporte. Los factores de 1, 0.5 y 0 se asignan a las observaciones de aumento, no cambio y declive, respectivamente, usando la siguiente ecuación:

$$R_{SG} = (R - 0.5n) * 100$$

Donde: R = Porcentaje de pozos con niveles crecientes de agua.

n = Porcentaje de pozos sin cambio en el nivel del agua.

- Demanda

Para evaluar la demanda del recurso (RD), la cantidad de agua (m³/año) se evalúa en relación con la cantidad total de agua dulce renovable (T), donde el 100% corresponden a una puntuación de 0 y 0% corresponde a una puntuación de 100. Por lo tanto, la siguiente ecuación se usa para calcular RD:

$$R_D = \left(1 - \frac{a}{T}\right) * 100$$

Donde: a = Cantidad de agua (m³/año)

T = Recursos hídricos renovables totales (m³/año)

Si $\left(\frac{a}{T}\right) \geq 1$, RD = 0

- Estrés

Para calificar este indicador, la cantidad anual de agua consumida se evalúa en relación con el caudal total renovable. Según la OCDE, se requiere el 60% del caudal renovable para mantener un ecosistema saludable y funcional de la fuente. Por lo tanto, al puntuar este indicador de estrés del ecosistema (ES), se asigna una puntuación de consumo mayor o igual al 40%.

$$E_S = \frac{0.4 - c/T_{sur}}{0.4} * 100$$

Donde: c = cantidad anual de agua consumida (m³/año)

T_{sur} = Flujo superficial renovable anual total (m³/año)

Si $c/T_{sur} > 0.4$, entonces ES = 0

Si $c/T_{sur} = 0$, entonces ES = 100

Si $0.4 > c/T_{sur} > 0$, entonces usa la ecuación anterior para resolver ES

Este indicador no solo es relevante para la salud del ecosistema sino también para el uso sostenible del agua en la comunidad

Una vez que se calculan los puntajes de los indicadores, los puntajes de los componentes se determinan tomando el puntaje promedio de los tres indicadores que componen cada indicador ver Tabla 8. El puntaje final del índice se determina usando la siguiente ecuación:

$$CWSI = \frac{\sum_{i=1}^N W_i X_i}{\sum_{i=1}^N W_i}$$

Donde: Xi se refiere al componente i del índice para una comunidad en particular

Wi es el peso aplicado a ese componente.

En la evaluación estandarizada del CWSI, cada componente tiene la misma ponderación y, por lo tanto, igual al promedio de los quince indicadores.

Si una comunidad decide que un componente es más importante que otro, las ponderaciones se pueden ajustar en consecuencia para el análisis interno, aunque dichos resultados no se utilizarán para las comparaciones entre comunidades (Policy Research Institute, 2007).

2.2.3 Israel

Metodología usada en este país.

2.2.3.1 *Índice de escasez (WEAS)*

Índice de escasez que mide varios factores dentro de los que se encuentran: La tasa de crecimiento de la población, disponibilidad de agua, agua doméstica, industrial y ecológica. El modelo sugiere mejoras en los patrones de intercambio de información (recopilación de información e intercambio de información sobre cuencas, desalinización, técnicas de reutilización, etc.), creación de capacidad institucional (mano de obra calificada, organización) y administración. (Asheesh, 2003)

WEAS utiliza un enfoque de balance hídrico para cuantificar la cantidad de agua que ingresa a un área (oferta) (a través de precipitaciones, ríos, flujos de agua subterránea además de reutilización de agua, otros recursos hídricos obtenidos por transporte o importación y desalinización) y la demanda (a través de la evaporación, la transpiración de las plantas, los ríos y los flujos de aguas subterráneas u otras pérdidas de agua). (Asheesh, 2003)

El índice de escasez desarrollado en este estudio refleja la relación entre la oferta y la demanda, este último en función del crecimiento de la población. El elemento principal de la ecuación es el crecimiento poblacional, que determina todos los parámetros de demanda del sector hídrico. El crecimiento de la población aumentará la demanda de agrícola, dotación neta y desarrollo de la industria. (Asheesh, 2003)

En caso de arrojar un valor negativo, este valor será interpretado como una escasez del recurso en la zona de estudio.

$$W_{sci} = \left[\frac{\alpha}{\left(\left[\frac{100}{100-\rho} \right] * \beta^{\lambda \Delta t} * (\varepsilon + \gamma + \delta) * \left(\frac{100}{100-k} \right) + h + b \right)} \right] - 1$$

Donde:

W_{sci} : *Índice de escasez*

α : *Oferta anual de agua.*

ε : *Demanda interna anual (m³/año)*

γ : *Demanda de áreas verdes (m³/año), Depende del crecimiento de la población (m³/año)*

δ : *Demanda de riego (m³/año)*

λ : *= Ln (1+r), Tasa de crecimiento de la población*

Δt : *El tiempo durante el cual se realiza la estimación, el período se puede calcular como la diferencia entre el presente y el futuro (t-k);*

β : *Población*

t : *Periodo de tiempo*

h : *Evaporación anual del país.*

b : *Caudal Ecológico*

k : *Pérdidas estimadas*

p : *Demanda industrial como porcentaje, su valor se puede determinar como 15-25 por ciento de la demanda interna*

2.2.4 Países Bajos

Metodología para este país,

2.2.4.1 Huella Hídrica (HH)

(Hoekstra, 2003) introdujo el concepto de huella hídrica como un indicador de uso de agua.

Indicador que entrega información respecto al uso consuntivo del agua dulce y contaminación de ésta por los diferentes sectores demandantes de recursos hídricos, tres componentes son identificables: la huella azul (HHA), la huella verde (HHV) y la huella gris (HHG). Mientras la huella azul (HHA) es el volumen de agua azul que es consumida por las actividades humanas, la huella verde (HHV) representa la fracción de “agua verde” que es consumida principalmente por la producción forestal y agrícola. La huella gris (HHG) es definida como el volumen de agua dulce requerida para diluir los contaminantes hasta el punto en que la calidad cumpla los estándares aceptables (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011). Es importante señalar que el concepto de huella hídrica considera, también, el uso indirecto del agua (agua virtual), el cual para efectos de del presente trabajo no es tomado en cuenta, principalmente por la dificultad que demanda su estimación.

El cálculo de HHA, HHV y HHG permite, mediante su relación con la oferta, valorar diversas dimensiones de la seguridad hídrica de una cuenca, calculando entregar indicadores de niveles de satisfacción de la demanda en términos de cantidad y calidad por parte de las actividades humanas y sistemas ecológicos. Por lo anterior formula que establece la relación entre la demanda y la oferta de agua está dada por la fórmula:

$$S = \frac{HH}{Disp} * 100$$

donde S es el indicador de escasez hídrica (%), HH corresponde a la huella hídrica (demanda) de un sector productivo particular a nivel cuenca (m³/s) y Disp corresponde al recurso hídrico disponible para dicho sector calculado en función de la oferta (caudal medio anual + tasa de recarga media anual del acuífero; m³/s) y el caudal (ecológico m³/s).

(Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011) señalan los errores comunes cometidos en los índices desarrollados por diferentes autores:

1. Las extracciones de agua regresan parcialmente a una cuenca de captación. Por lo tanto, utilizar la extracción de agua como el principal indicador del uso del agua no es un buen método para evaluar el efecto de la extracción en la escala de la cuenca como un todo. En cambio, el consumo de agua azul en una región debe expresarse en términos de una huella de agua azul.

2. La disponibilidad de agua no debe ser únicamente definida por la esorrentía total porque ignora la fracción de la esorrentía requerida para mantener el medio ambiente. La demanda ambiental debe restarse de la esorrentía total.

3. La evaluación de la escasez de agua como una función del uso anual y la disponibilidad de recursos no tiene en cuenta las variaciones durante el año. Sería más exacto considerar los valores mensuales.

La evaluación de la escasez de agua se puede obtener sumando todas las huellas hídricas. La escasez de agua puede evaluarse a nivel local (rio, quebrada, aljibe) y a nivel de cuenca hidrográfica. Para esto se incorporan impactos ecológicos, socio-económicos, políticos y humanos.

En Colombia se desarrolló el documento “EVALUACIÓN MULTISECTORIAL DEL LA HUELLA HÍDRICA EN COLOMBIA” resultados por subzonas Hidrográficas en el marco del estudio nacional del Agua 2014. Documento que muestra el desarrollo de la metodología para el cálculo de la Huella Hídrica.

2.2.5 Colombia

Presenta la siguiente metodología:

2.2.5.1 *Estudio Nacional de Agua IDEAM*

La primera versión del Estudio Nacional de Agua (ENA), fue presentado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales en el año 2008, el cual nace como un aporte científico que muestra los avances tecnológicos y lineamientos de ingeniería en materia de evaluación hidrológica. Haciendo énfasis en las relaciones de demanda de agua y oferta hídrica y disponibilidad anual de agua. Dentro del contenido mostrado se desarrollan los numerales: Modelos conceptuales del índice de disponibilidad anual de agua, Elementos conceptuales del índice de escasez, Modelo para la estimación del índice de escasez, Modelo para la estimación de la oferta hídrica superficial y Modelo para la estimación de la demanda potencial de agua. Información que se desarrollara en el capítulo que explica la metodología de obtención del índice de escasez.

En esta versión se dan las pautas para establecer el índice de disponibilidad anual de agua expresado en metros cúbicos por habitante/año

Tabla 9 Categorías del índice de disponibilidad anual de agua

Categoría	Valor del índice	Observación
Estrés hídrico	1.700 m ³ - 1.001 m ³	La situación amerita ampliar las medidas de adaptación y adecuar dispositivos para el aprovechamiento de aguas lluvias y subterráneas.
Escasez de agua	1.000 m ³ - 501 m ³	Las medidas de ahorro y uso eficiente del agua deben reforzarse y conducir las pérdidas de agua por transmisión y distribución a menos del 5%.
Escasez severa de agua	Igual o menor a 500 m ³	Se presentan problemas de abastecimiento de agua imposibles de superar, el desarrollo económico se restringe fuertemente.

Fuente: (Instituto de Hidrología M. y., 2008)

El modelo que permite estimar la disponibilidad anual de agua es el siguiente:

$$I_d = \frac{Q_s}{P}$$

Donde:

Q_s: Volumen de agua superficial escurrido en un año de una región, expresado en metros cúbicos al año.

P: Población de la región, expresada en cantidad de habitantes al año.

Es importante señalar que la disponibilidad anual de agua sólo toma en cuenta la población como factor de presión, sin caracterizar el uso que esa población hace de los recursos naturales en la cuenca; por lo anterior, es posible que un país en particular experimente problemas críticos de agua, aunque cuente con un alto valor del índice de disponibilidad anual de agua. (Instituto de Hidrología M. y., 2008).

Posterior a la publicación de ENA en el año 2008, se publica ENA 2010 que tiene el objetivo de consolidar y actualizar la información sobre la distribución regional y local de la disponibilidad de agua y las condiciones de sostenibilidad del recurso hídrico. Algunos de los numerales desarrollados en el informe son: Balance hídrico nacional, Caudal mínimo para sostenimiento de los ecosistemas, Cuantificación de la oferta hídrica, Demanda hídrica, (Relaciones demanda, oferta y vulnerabilidad), Índice de escasez, Índice de vulnerabilidad Índice de Aridez y la Proyecciones de demanda y oferta para 2015 y 2025.

Una de las principales diferencias encontradas en las versiones 2008 y 2010 del estudio nacional del agua; es que la segunda versión incluye el concepto de índice de vulnerabilidad de los sistemas hídricos por disponibilidad de agua para suplir las demandas; e incluye el concepto de índice de Aridez. De igual forma se determinan en forma indicativa la presión sobre la calidad del agua, en términos de generación de demanda biológica de oxígeno (DBO), de los sectores usuarios del recurso y las posibles restricciones de uso de la oferta hídrica por alteración de la calidad del agua. Finalmente incluyen conceptos fundamentales sobre oferta total y neta. La primera corresponde al volumen total generado, sin tener en cuenta factores de reducción, y la segunda –la oferta neta–, a la disponibilidad de agua de acuerdo con su calidad y el volumen mínimo disponible que debe fluir por los cauces para el sostenimiento de los ecosistemas. Con esta última oferta y su relación con otros factores, se estiman las condiciones de sostenibilidad del recurso hídrico. (Instituto de Hidrología M. y., 2010).

ENA 2010 calcula la estimación de la oferta hídrica considerando tres unidades de análisis: los sistemas hidrográficos de referencia que cubren a todo el país; el área municipal como generadora de agua, a partir del rendimiento hídrico de su territorio, y las áreas de las fuentes que abastecen las cabeceras municipales. Al no disponer aún de resultados sobre los factores de reducción específicos para cada sector usuario, y considerando que la oferta estimada no está disponible en su totalidad por las limitaciones que para ciertos usos representan las condiciones de calidad y la necesidad del ecosistema de contar con un caudal mínimo en las diferentes épocas del año, se redujo la oferta de acuerdo con los siguientes criterios: reducción de la oferta por regiones naturales, aplicando un porcentaje global en función de la actividad humana; en aquellas regiones con mayor contenido de material contaminante, la reducción para el municipio se estimó en 50% y para sus cabeceras municipales, en 40%. En las regiones con una actividad antrópica menos significativa y con grandes excedentes de agua, se aplicó una reducción de 40%, tanto para los municipios, como para las cabeceras municipales. (Instituto de Hidrología M. y., 2010),

ENA 2010 desarrolla los conceptos de demanda para diferentes usos y propone metodologías para su cálculo; dentro de las que se encontraron.

Demanda de la población por habitante (DHT), Demanda industrial urbana y de grandes consumidores (DUI), Demanda de los sectores comercial y de servicios (DS), Demanda pecuaria (DP), Demanda de distritos de riego grandes y pequeños (DRG) y la Demanda Eléctrica (DEH) y Termo-eléctrica (DET).

Finalmente, mediante la publicación del último estudio nacional de agua (ENA) 2014, IDEAM toma como referencia para su elaboración, la investigación formulada por (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011) relacionada con la Huella Hídrica y aplica varios de sus conceptos para el desarrollo del ENA. De igual forma que en los estudios anteriores el objetivo de este es enfocar sus esfuerzos en actualizar los conceptos para la estimación de la oferta y la demanda de agua en el país. Dentro de los indicadores desarrollados en este estudio se encontraron:

1. Indicadores del sistema hídrico: Índice de retención y regulación hídrica -IRH e Índice de aridez
2. Indicadores de intervención antrópica
 - Indicadores de presión por uso de agua: Índice de uso del agua superficial -IUA. Índice de presión hídrica al ecosistema -IPHE, Índice de agua no retornada a la cuenca-IARC e Índice de eficiencia en el uso del agua -IEUA
 - Indicadores de Estado de Calidad y Presión por Contaminación: Índice de calidad de agua ICA e Índice de alteración potencial a la calidad del agua -IACAL
 - Indicadores de Riesgo: Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento-IVH

El análisis se complementó con un capítulo sobre el agua virtual, es decir, aquella que es incorporada a los procesos productivos y se exporta contenida en los bienes y productos. Este capítulo fue elaborado por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia CTA y Good Stuff International, auspiciado por la Embajada de Suiza – Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE, en el marco del proyecto SuizAgua Colombia. Este trabajo fue desarrollado en coordinación con todo el equipo interdisciplinario del IDEAM.

Dentro de los cambios encontrados en la versión 2010 a la versión 2014 es el gran número de nuevos indicadores propuestos. Esto teniendo en cuenta la metodología propuesta por (Hoekstra, Chapagain, Aldaya, & Mekonnen, 2011) y los conceptos de agua Azul y Agua Verde. Adicionalmente evoluciona el concepto de índice de escasez teniendo en cuenta los conceptos de huella hídrica y aplicándolo a nuevos índices como lo son Índice de Agua No Retornada a la Cuenca (IARC), Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas (IPHE) y el Índices de uso de agua (IUA).

2.2.5.2 Resolución 865 de 2005 – Índice de escasez IDEAM

El objetivo del indicador es medir la relación de (oferta hídrica) / (demanda potencial de agua de los distintos sectores productivos). Y calcular un indicador que prediga el nivel de presión sobre los recursos hídricos, expresado en forma porcentual.

La expresión de cálculo del índice de escasez en su forma porcentual es:

$$I_e = \frac{D_t}{O_n} * 100\%$$

Donde: I_e - Índice de escasez [%], D - Demanda total de agua [m^3], O_n - Oferta hídrica superficial neta [m^3].

Para la valoración del índice en Colombia, se presentó las siguientes categorías de valoración. Se formulan cuatro categorías: (IDEAM, 2004):

- a. Alto – la demanda es > 40% Existe fuerte presión sobre el recurso hídrico, denota una urgencia máxima para el ordenamiento de la oferta y la demanda. En estos casos la baja disponibilidad de agua es un factor limitador del desarrollo económico.
- b. Medio – Los requerimientos de agua están entre el 20 y el 40% de la oferta hídrica neta. Cuando los límites de presión exigen entre el 20 y el 40% de la oferta hídrica disponible es necesario el ordenamiento tanto de la oferta como de la demanda. Es menester asignar prioridades a los distintos usos y prestar particular atención a los ecosistemas acuáticos para garantizar que reciban el aporte hídrico requerido para su existencia. Se necesitan inversiones para mejorar la eficiencia en la utilización de los recursos hídricos.

- c. Moderado – la demanda de agua se encuentra entre el 10% y el 20% de los volúmenes de agua ofrecidos por la fuente. Indica que la disponibilidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador del desarrollo.
 - d. Bajo – la demanda de agua se encuentra <10% de los volúmenes de agua ofrecidos por la fuente. No se experimentan presiones importantes sobre el recurso hídrico.
- Definición de la oferta hídrica

La oferta hídrica neta se calcula a partir de la oferta total y oferta neta (restándoles el régimen de estiaje y factor de reducción). La oferta hídrica superficial se calcula a través de la siguiente expresión:

$$O_e = O_t * (1 - R_e - R_{it})$$

Donde:

O_t = Oferta hídrica superficial total [m³];

R_e = Factor de reducción para mantener el régimen de estiaje;

R_{it} = Factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica.

El volumen de oferta hídrica total se obtiene como:

$$O_t = O_o * T$$

Donde: O_o - caudal modal de la fuente abastecedora [m³/s] y T cantidad de segundos en un año.

Tomando como referencia la metodología para el cálculo de la oferta hídrica total (IDEAM, 2004), en esta se sugiere calcular de la esorrentía superficial mediante el método de generalización aplicando el método de interpolación óptima. Una vez definido este valor se procede a calcular del volumen de agua escurrido por el área de la cuenca teniendo en cuenta el tipo de cobertura.

Finalmente se calcula la oferta neta descartando el régimen de estiaje y el factor de reducción. Para definir R_e se construye la curva de densidad probabilística (CDP) de los caudales de estiaje min Q_{min} . De esta curva se extrae el caudal de estiaje con el 97.5% de probabilidad de excedencia $Q_{min 97.5\%}$ de modo que la reducción para mantener el régimen de estiaje de la fuente sería igual a:

$$R_e[\%] = 100 * \frac{Q_{\min 97.5\%}}{Q_0}$$

La definición del factor de reducción para protección de fuentes frágiles es una función de las magnitudes del valor modal de la esorrentía (Q) su coeficiente de variación (C_v), su coeficiente de asimetría (C_s) y de la persistencia (D) de los caudales diarios expresada a través de la memoria de la función de autocorrelación de los caudales diarios de la fuente abastecedora. De este modo la mayor reducción para protección de fuentes frágiles la obtendrán aquellas corrientes en las que el valor modal (Q) tiende a ser el menor de todos los valores modales observados en el dominio de aplicación del índice de escasez, de igual modo será en aquellas corrientes donde se cuente con grandes coeficientes de variación ($C_v \uparrow$), asimetría negativa ($C_s \ll 0$) y larga persistencia en los caudales diarios (para aquellos casos en que $Q \rightarrow 0$). Para tener una idea de la forma analítica o tabulada de la función $R_{it} = f(Q, C_v, C_s, D)$ es necesario evaluar todos los parámetros independientes en todos los puntos de evaluación del índice de escasez con el fin de realizar una clasificación de todas las combinaciones posibles de (Q, C_v, C_s, D), que permita distribuir entre ellos valores de reducción desde el 0 hasta el 50% (IDEAM, 2004).

Tabla 10 Rangos y categorías del índice del uso del agua (IUA)

Categoría	Rango	Color/Rango
Alto	>50%	Demanda Alta
Medio Alto	21% – 50%	Demanda Apreciable
Medio	11% – 20%	Demanda Baja
Mínimo	1% – 10%	Demanda muy baja
No significativo	≤ 1%	Demanda no Significativa

Fuente: (Instituto de Hidrología M. y., 2010)

- Definición de la demanda

Para el cálculo de la demanda se tendrán en cuenta tres escenarios: 1. Cuando exista información media, 2. Cuando exista información media, pero es insuficiente y 3. Cuando no exista información. (IDEAM, 2004)

Para el primer escenario el cálculo de la demanda es igual a:

$$D_t = D_{ud} + D_{ui} + D_{us} + D_{ua} + D_{up}$$

Donde:

D_{ud} = Demanda de agua para consumo doméstico

D_{ui} = Demanda de agua para uso industrial

D_{us} = Demanda de agua para el sector de servicio

D_{ua} = Demanda de agua para uso agrícola

D_{up} = Demanda para uso pecuario

Para el cálculo del segundo escenario se sugiere aplicar la fórmula mostrada y completar los datos faltantes usando la metodología propuesta para el escenario tres.

Para el escenario tres se debe estimar potencialmente el volumen de agua demandada en millones de metros cúbicos a nivel sectorial. Estas estimaciones se basan principalmente en la asociación de dos variables: el volumen de producción sectorial y un factor de consumo de agua por tipo de bien, con el limitante de que estas estimaciones no contemplan las pérdidas de los sistemas de conducción, almacenamiento, tratamiento y distribución del agua en el suministro de agua potable y a nivel de la industria, tampoco tienen en consideración el nivel tecnológico, los métodos de producción limpia y el uso que del agua hace la industria extractiva (IDEAM, 2004).

El cálculo de la demanda de agua para **consumo doméstico** D_{ud} - [m³] se realiza utilizando la siguiente expresión:

$$D_{ud} = D_{pcu} * n_{hu} + D_{pcr} * n_{hr}$$

Donde: D_{pcu} - demanda anual urbana, n_{hu} número de habitantes urbanos, D_{pcr} - demanda anual rural, n_{hr} - número de habitantes rurales.

La demanda de agua para **uso industrial** - [m³] se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$D_{ui} = \sum_{i=1}^n Vp_i * Fc_{ji}$$

Donde: Vp_i , Fc_{ji} son el volumen de producción y factor de consumo de agua por tipo producción y n es el número de sectores industriales considerados (Lvovotc, 1970).

La demanda de agua para el **sector de servicios** D_{US} - [m³] se obtiene como:

$$D_{us} = \sum_{i=1}^n N_i * Fcs_i$$

Donde: N_i y Fcs_i representan el número de establecimientos por tipo de servicio y el factor de consumo por tipo de servicio. Aquí n representa el número de tipos de servicios tomados en cuenta.

Los requerimientos del **uso agrícola** D_{ua} [m³] se establecen mediante la siguiente fórmula:

$$D_{ua} = [P - (ETP * kc)] * ha$$

Aquí: D_{ua}^i - Demanda del i -ésimo cultivo, P - precipitación anual, ETP - es la evapotranspiración potencial, kc_i es el factor de consumo del i -ésimo cultivo (FAO 33) y ha_i el número de hectáreas cultivadas con él. Por último, (n) representa el número de cultivos considerados.

La demanda para **uso pecuario** D_{up} - [m³] es:

$$D_{up} = \sum_{i=1}^n Vpa_i * Fca_i ;$$

En Vpa_i constituye el volumen de producción por tipo de animal industrial, Fca_i es el factor de consumo según tipo de animal y (n) representa el número de tipos considerados.

Por lo anterior en el desarrollo del numeral 0, se presentaron las metodologías usadas por los países relacionados para el cálculo del indicador de escasez. En el caso de Colombia se indican las propuestas que a la fecha se han elaborado para evaluar la disponibilidad y la oferta de agua superficial. Iniciando con las metodologías presentadas por el Estudio Nacional de Agua y culminando con las propuestas para el cálculo de índice de escasez. Las dos formuladas por el IDEAM.

2.3 MEJORAS SUGERIDAS A LA METODOLOGÍA IDEAM

Dando cumplimiento a los objetivos del presente trabajo, a continuación, se relacionan las críticas más representativas que se les han elaborado con relación a la metodología para la obtención del cálculo del indicador de escasez.

De la investigación realizada se evidencio que, con relación a la metodología para determinar el índice de escasez, se ha formulado cuatro estudios que exponen los resultados referentes a la aplicación de la metodología IDEAM. Razón por la cual, con el fin de resumir sus argumentos, se genera la siguiente matriz comparativa. En la cual se incluyen la propuesta que presento el IDEAM para el cálculo del indicador y los cuatro estudios en mención, adicionalmente se incluye las metodologías aplicadas en el Estudio nacional de agua para los años 2010 y 2014. Esta permitirá caracterizar las metodologías expuestas y establecer conclusiones respecto a las propuestas.

Estudio uno: Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial. (IDEAM, 2004)

Estudio dos: El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis ó una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico? (Dominguez Calle, Costa Posada , Gonzalo Rivera, & Vanegas Sarmiento , 2005)

Estudio tres: Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico colombiano. (Domínguez, Rivera, Vanegas, & Moreno, 2008)

Estudio cuatro: Ajuste metodológico al índice de escasez de agua propuesto por el IDEAM en el plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Pamplonita, Norte de Santander, Colombia. (Infante Romero & Ortiz, 2008)

Estudio nacional del agua (ENA) 2010 - (Instituto de Hidrología M. y., 2010)

Estudio nacional del agua (ENA) 2014 - (Instituto de Hidrología M. y., 2015)

2.3.1 Propuestas de mejoramiento para el cálculo de la oferta

De acuerdo con la comparación de métodos usados para el cálculo de la oferta tota y la oferta neta se observa que al momento de su cálculo los autores concuerdan en que, por falta de información hidrometeorológica en las zonas de estudio, es común recurrir a principios de generalización, regionalización y espacialización de la información. Referente al método de interpolación de los nodos de monitoreo se encontró que los estudios concuerdan en el uso de los métodos propuestos por Método Gandin y el Método de Kriging. Referente a la metodología para el cálculo del régimen de estiaje y el factor de reducción

que son tenidos en cuenta al momento de calcular la oferta neta. Se encontró que los estudios usan la metodología entregada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2004) mejorada. Uno de los cambios encontrados, es que con la publicación del ENA 2014 (Instituto de Hidrología M. y., 2015) se incluye el concepto de caudal ecológico, aplicada como la metodología para el cálculo de los caudales de estiaje de la fuente superficial.

Finalmente, con la publicación del ENA 2014, se corrobora que los métodos para el cálculo de la Evapotranspiración más usados son el de Penman, Budyko y Turc. Así mismo en este informe se puede inferir que la combinación del método de estimación de la evapotranspiración Budyko funciona mejor en zonas planas o de bajas altitudes.

A continuación, se muestran los resultados del análisis comparativo de las metodologías encontradas para el cálculo del índice de escasez en Colombia.

Tabla 11 Matriz de comparación de metodologías para el cálculo de la oferta en Colombia.

	Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3	Estudio 4	ENA 2014
Metodología usada para el cálculo de la oferta hídrica superficial total.	<p>Técnicas de generalización espacial de la escorrentía superficial.</p> <p>Métodos indirectos por falta de datos:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Relaciones escorrentía versus parámetros morfológicos. -Balance hídrico -Modelos lluvia – escorrentía 	<p>Métodos indirectos por falta de datos:</p> <p>Metodología de la UNESCO (1979)-Regionalizaciones hidrológicas.</p> <p>Para la generalización espacial se aplicó el método de interpolación óptima</p>	<p>Misma metodología del estudio 2.</p>	<p>Áreas hidrológicas homogéneas.</p> <p>Para la generalización espacial se aplicó el método de interpolación óptima</p>	<p>-Balance hídrico de largo plazo para condiciones hidrológicas de año medio.</p>
Metodología para completar las series de tiempo.	<p>No especifica</p>	<p>Metodología para la estimación de datos faltantes en series temporales diarias. Martínez y Ruíz 1998.</p>	<p>Misma metodología del estudio 2.</p>	<p>No especifica</p>	<p>No especifica</p>
Metodología empleada para cálculo del valor modal de los caudales	<p>Análisis estadísticos: Ajuste de una curva teórica a la función de distribución empírica.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Curvas de la familia de Pearson -Subgrupo de la curva de distribución y de tres parámetros. 	<ul style="list-style-type: none"> -Subgrupo de la curva de distribución y de tres parámetros. usando los criterios de Kolmogorov, Pearson y Smirnov. 	<p>Misma metodología del estudio 2.</p>	<p>Misma metodología del estudio 2</p>	<p>No especifica</p>
Métodos de interpolación de los nodos de monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> -Método Gandin (1963, 1976). -Método de Kriging <p>Modelos que permite la construcción del variograma empírico. Este se construye usando modelos teóricos lineal, esférico, exponencial, cuadrático y/o gaussiano.</p>	<p>No especifica</p>	<p>Método Gandin (1963, 1976).</p>	<p>Cálculo de error absoluto de los métodos:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Kriging, Spline y -Inverse Distance Weighted (IDW). <p>Para esto el autor sugiere el calcular el error absoluto de los métodos de interpolación.</p>	<p>No especifica</p>

	Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3	Estudio 4	ENA 2014
Métodos de cálculo de la evapotranspiración real.	Budyko, Kristensen Jensen Turc, Thornthwaite Mather y Penman	No especifica	No especifica	No especifica	Penman, Budyko y Turc
Metodología calculo régimen de estiaje.	Curva de duración de caudales de cada año, de la cual se extrae el caudal promedio del periodo de aguas bajas. Este caudal se calcula como el promedio aritmético de los caudales que son superados el 75% del tiempo durante el año.	Se construye la función de distribución probabilística de los caudales de estiaje. De la función de distribución de probabilidad se obtiene el caudal de estiaje con el 97.5%.	Misma metodología del estudio 2.	Misma metodología del estudio 1.	<p>Uso de metodología para cálculo de caudal ecológico.</p> <p>Primer Grupo</p> <p>A cuencas de autorregulación alta y poca variabilidad de caudales diarios, en que se considera representativo el valor característico Q85 de la curva de duración. A estaciones con un índice de regulación hídrica igual o superior a 0.7 (alta retención y regulación).</p> <p>Segundo Grupo:</p> <p>Corresponde a cuencas con valores inferiores de índice de regulación hídrica de 0.7. A las cuales se les asigna un valor característico de Q75 de la curva de duración de los caudales medios diarios.</p>
Metodología factor de reducción de para protección de fuentes frágiles.	Es una función de las magnitudes del valor modal de la esorrentía, su coeficiente de variación, su coeficiente de asimetría y de la persistencia de los caudales diarios expresada a través de la memoria de la función de autocorrelación de los caudales diarios de la fuente abastecedora.	Misma metodología del estudio 1.	Misma metodología del estudio 1 mejorada. Argumenta que la estructura explícita del funcional, es de antemano desconocida, por ello como primera aproximación para obtener R_{it} .	Misma metodología del estudio 1. Para esto el autor sugiere ponderar el valor de lámina modal, lámina de estiaje, coeficiente de variación y reducción por estiaje para el área de estudio dentro de la cuenca.	Uso de metodología para cálculo de caudal ecológico.

Fuente: Elaboración propia, 2018

Dentro de las críticas realizadas a la metodología para el cálculo de índice de escasez IDEAM, se referencia la del estudio (Infante Romero & Ortiz, 2008), el cual manifiesta que el ajuste a la metodología permite mejorar el nivel de resolución de la información relacionada con la oferta hídrica superficial.

Cuando alguno de estos elementos se ve modificado por motivos conceptuales o de tipo técnico en la toma o procesamiento de la información se reduce la confiabilidad del índice, lo que se traduce directamente en la pérdida de credibilidad de un elemento guía en la política de gestión ambiental a nivel regional. (Infante Romero & Ortiz, 2008)

En su estudio se calcula la oferta a través del método de áreas **hidrológicas homogéneas**. Inicialmente se deduce para cada una el caudal modal (caudal de mayor probabilidad de ocurrencia durante el año) es calculado de los **caudales medios mensuales multianuales**. Encontrando que esta concuerda con la usada por el IDEAM 2004, que expone que los cálculos de escorrentía superficial “*se utiliza el valor modal de los caudales y no su promedio*”.

Seguidamente para el cálculo de caudal de estiaje (caudal cuya probabilidad de ocurrencia se encuentra durante 97.5% del año y también se expresa como el de un año con condiciones secas) con probabilidad de excedencia del 97.5%, en la metodología entregada por (Infante Romero & Ortiz, 2008) se calcula usando los **caudales diarios de la serie histórica**.

En la metodología propuesta por él (IDEAM, 2004) no se puede inferir la frecuencia con la que se trabajaran las series de caudales, ya que propone construir la curva de duración de caudales de cada año, de la cual se extrae el caudal promedio del periodo de aguas bajas. Este caudal se calcula como el promedio aritmético de los caudales que son superados el 75% del tiempo durante el año. Razón por la cual se infiere que se puede trabajar igualmente con los caudales diarios de la serie. Durante el desarrollo de este documento se ampliará la información referente al cálculo del caudal de estiaje.

Otra de las propuestas de (Infante Romero & Ortiz, 2008), es sugerir que, para el cálculo de interpolación, inicialmente se calcule del “error absoluto de los métodos de interpolación para lámina modal y de estiaje”. Indicando que con esto se encontrara el método más confiable. Dentro de los métodos propuestos en su estudio se resaltan los de: a) Kriging, b) Spline y c) Inverse Distance Weighted (IDW). La propuesta se materializa con el uso de la siguiente fórmula:

$$E = \sum_{i=0}^n |R_i - M_i|$$

Donde:

E: Error absoluto para cada método de interpolación.

R_i: Valor real capturado por la estación analizada.

M_i: Valor obtenido por interpolación mediante cada uno de los métodos.

Finalmente, otra de las propuestas de (Infante Romero & Ortiz, 2008) es la de ponderar el valor de lámina modal, lámina de estiaje, coeficiente de variación y reducción por estiaje para el área de estudio dentro de la cuenca. Este ajuste propuesto logra organizar y obtener resultados más confiables. Para esto propone en el uso de la siguiente fórmula:

$$Mpv = \sum_{i=0}^n (Var_i * Ap_i)$$

Donde:

Mpv: Media ponderada de la variable

Var: Variable

Ap: Porcentaje de área.

Otra de las mejoras encontradas a la metodología propuesta por el IDEAM 2004, la presenta el autor (Domínguez, Rivera, Vanegas, & Moreno, 2008), con relación al cálculo de la reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica y propone su estimación a través de un funcional de la forma.

$$R_{it} = f(Q, C_v, C_s, D)$$

Donde C_v , C_s , D representan los coeficientes de variación y de asimetría de los caudales promedio anuales y el radio de correlación de los caudales diarios.

La estructura explícita del funcional es de antemano desconocida, por ello como primera aproximación para obtener R_{it} se recomienda aplicar la siguiente tabulación:

Tabla 12 Escala de reducciones por irregularidad temporal de la oferta hídrica.

C_v	R_{it} , [%]	C_v	R_{it} , [%]	C_v	R_{it} , [%]
0 – 0.2	15	0.3 – 0.4	35	>0.6	50
0.2 – 0.3	25	0.4 – 0.6	40		

Fuente: (Domínguez, Rivera, Vanegas, & Moreno, 2008)

Los porcentajes de reducción fueron tomados de la comparación entre las magnitudes de los coeficientes de variación de la esorrentía anual y la desviación estándar de los caudales diarios alrededor de la media anual multianual. Este análisis mostró que la variabilidad de los caudales diarios es del doble de la variabilidad de la esorrentía promedio anual, lo que permite asegurar que los valores de C_v para caudales anuales sirven como indicador de la variabilidad diaria. Se observó que a C_v mayores a 0.6 les corresponde una variabilidad diaria mayor al 100%, debido a que esta variabilidad arroja despliegues en ambos sentidos, hacia los máximos y hacia los mínimos, se aplicó un valor de reducción correspondiente a la mitad de la variabilidad total en caudales diarios. Para los C_v menores a 0.6 se asignaron reducciones siguiendo el mismo principio. La distribución espacial de C_v muestra que en el 70% del territorio colombiano este coeficiente alcanza valores entre 0.2 y 0.3, de modo que la reducción más frecuente por variabilidad de la oferta alcanza el 25% de acuerdo con la Tabla 12. Al 17% del territorio colombiano le correspondieron reducciones cercanas al 40% (Domínguez, Rivera, Vanegas, & Moreno, 2008).

Con lo anterior es posible mejorar la aproximación el cálculo de R_{it} , y de esta manera se calcule con un método más fácil de aplicar.

Por lo expuesto anteriormente, se relación las principales mejoras encontradas para el cálculo de oferta:

- Cálculo del error absoluto de los métodos de interpolación para lámina modal y de estiaje.
- Para el cálculo del caudal de estiaje se usen los registros de los caudales diarios de la serie histórica.
- Propuesta de uso de escalas para el cálculo del caudal de reducciones por irregularidad temporal de la oferta hídrica.
- Uso del concepto de caudal ecológico que depende de la época del año y de otros factores específicos de cada cuenca hidrográfica.

Lo anterior sugiere que la actualización más importante que se ha propuesto es el uso del concepto de caudal ecológico para el cálculo de los caudales de estiaje de las fuentes superficiales. Propuesta presentada en el estudio nacional de agua 2014.

2.3.2 Propuestas de mejoramiento cálculo de demanda

De los estudios de caso analizados, se pudo concluir que posterior a la publicación de ENA 2014, los autores aplicaban la metodología formulada por el IDEAM 2004 para el cálculo de la demanda en los sectores doméstico, industrial, servicios, agrícola y pecuario.

Dentro de los cambios o mejorar propuestos a la metodología IDEAM 2004, se encontró la presentada por (Infante Romero & Ortiz, 2008), el cual formula que para el cálculo de la demanda agrícola se haga uso de los módulos de consumo. ENA 2014 igualmente incluyen el procedimiento de cálculo de módulos de consumo para el cálculo de la demanda en los sectores de servicio y minería.

Por otra parte, se encontró que con la publicación del ENA 2014 se aplicó el concepto de huella hídrica verde y azul para sectores agrícola, pecuario, industrial, hidroeléctrico, doméstico y minero (extracción de petróleo). Además, se encontró con la publicación de ENA 2014, se incluyen las metodologías de cálculo para la demanda de los usos del agua del sector hidrocarburos y minería de oro y carbón. Finalmente, en ENA 2014 plantea que para el cálculo de la demanda doméstica se use la actualización realizada al RAS 2000 (Resolución 2320 de 2009) con relación al cálculo de la de dotación neta.

Otros de los cambios en una menor escala, pero igual significativos es la propuesta de investigar base de datos de entidades del estado diferentes a las formuladas en ENA 2010, esto permitirá tener un volumen mayor de información para el cálculo de la demanda para

los sectores agrícola, pecuario, industrial y sector servicios. Esta diferenciación se relaciona en la Tabla 13.

Tabla 13 Matriz de comparación de metodologías para el cálculo de la demanda en Colombia.

	Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3	Estudio 4	ENA 2010	ENA 2014
VARIABLES USADAS PARA CÁLCULO DE DEMANDA DOMÉSTICA	-Demanda anual urbana -Número de habitantes urbanos -Demanda anual rural -Número de habitantes rurales	Igual al estudio 1. Uso del RAS 2000. Uso de datos del DANE	Igual al estudio 2.	Igual al estudio 2.	Uso de coeficientes estándares de demanda por habitante. (Departamento Nacional de Planeación (DNP) y el Fondo Nacional de Desarrollo (Fonade)) Uso de datos del DANE	Igual al estudio 1. RAS 2000 y Resolución 2320 de 2009 MAVDT. Datos de la superintendencia de servicios públicos
VARIABLES USADAS PARA CÁLCULO DE DEMANDA INDUSTRIAL	-Volumen de producción según sector económico -Factor de consumo según sector económico	Igual al estudio 1. Uso de la encuesta anual manufacturera DANE incrementados por la tasa de crecimiento del PIB. Los factores de consumo por tipo de producción se tomaron de Water for Industrial, New York, USA 1963, Consejo Empresarial Colombiano para el Desarrollo Sostenible.	Igual al estudio 2 Sectores industriales considerados en el documento Water and life del autor (Lvovitch, 1986). Los factores de consumo por tipo de producción se tomaron de (UNESCO, 1979).	Igual al estudio 2.	Estimaron de acuerdo con el crecimiento real de la economía.	Registro Único Ambiental –RUA como fuente base de información para el cálculo de la demanda en el sector industrial. Se complementa con información de las Autoridades Ambientales registrada en bases de datos para cobro de la Tasa por Uso de Agua (TUA).
VARIABLES USADAS PARA CÁLCULO DE DEMANDA DEL	-Número de establecimientos por tipo de servicio	Igual al estudio 1.	Igual al estudio 1.	Igual al estudio 2.	Cálculo basándose en el crecimiento real del sector de servicios.	Registros municipales de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios clasificados como suscriptores comerciales, oficiales, especiales, temporales y multiusuario mixto; esta información no

	Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3	Estudio 4	ENA 2010	ENA 2014
sector de servicios	-Fcsi: Factor de consumo por tipo de servicio					desagrega los diferentes servicios que integran el sector. Ministerios de Salud, Educación y Comercio e Industria y Turismo, donde se obtienen los datos de camas de hospitales, habitaciones hoteleras, estudiantes matriculados en educación básica universitaria en todas las jornadas para los programas de pregrado y postgrado. A estos valores se les calcula el uso de agua por los módulos de consumo.
VARIABLES usadas para cálculo demanda del sector agrícola	-Precipitación -Evapotranspiración potencial -Coeficiente de uso de agua del cultivo (FAO 33) -Número de hectáreas cultivadas	Igual al estudio 1. Uso de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y de encuestas realizadas por las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agrícola (UMATA) y por las Unidades Regionales de Planeación Agropecuaria (URPA). Se siguió la metodología de la FAO (Estudio FAO No. 33, y National Research Council, 1998).	Igual al estudio 1.	Uso de los módulos de consumo.	Igual al estudio 1. Uso de la variación del coeficiente Kc a lo largo del crecimiento del cultivo, representada por la curva del coeficiente del cultivo.	Se incluye el concepto de huella Hídrica azul y verde para el cálculo de la demanda en el sector Agrícola. El requerimiento hídrico de los cultivos se determina a partir del cálculo de la evapotranspiración de los cultivos y del balance de agua en el suelo, definiendo mes a mes, el agua que el suelo retiene proveniente de la lluvia o del riego y que el cultivo puede extraer en su zona radicular. -Precipitación -Evapotranspiración potencial -Coeficiente de uso de agua del cultivo (FAO 2006) -Número de hectáreas cultivadas Información de cultivos se tomó de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales – EVA y las zonas de pasto se toman igualmente de los datos del (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia). Los valores totales de áreas sembradas se concertaron con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y el DANE, luego de analizar datos adicionales reportados por los gremios.
VARIABLES usadas para cálculo demanda del sector pecuario	-Volumen de producción por tipo de animal industrial -Factor de consumo según de producción animal	Igual al estudio 1.	Igual al estudio 1.	Igual al estudio 1	Cálculos teniendo en cuenta las tasas de crecimiento real anual del sector pecuario:	Estimación de la cantidad y distribución de cabezas de bovino y porcinos tomada del inventario del Ministerio de Agricultura. El consumo de agua utilizada en el sacrificio de bovinos y porcinos se realiza a partir de los archivos de Fedegan.

	Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3	Estudio 4	ENA 2010	ENA 2014
						Demanda de agua de pollos se usaron los datos del Fondo Nacional Avícola – Fonav. En cuanto al uso de agua, se contó con dos fuentes de información CIEM y Fenavi.
VARIABLES USADAS PARA CÁLCULO DEMANDA DEL SECTOR MINERO	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	<p>Los parámetros utilizados en el cálculo de la demanda en la minería del oro y carbón son tamaño y tipo de explotación (cielo abierto y subterráneo). los procesos de minería de oro y carbón.</p> <p>El cálculo para el ENA se hace asumiendo un factor de uso tomado del estudio publicado por el IDEAM en 2012, multiplicado por la producción de carbón y oro, según tipo de producción.</p>
VARIABLES USADAS PARA CÁLCULO DEMANDA DEL SECTOR HIDROCARBURO	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	<p>Se calcula a partir de la investigación realizada en 2012 por el IDEAM donde se identifican las actividades relacionadas con la producción de hidrocarburos en las fases de exploración, producción, transporte y refinación ajustadas con el sector.</p> <p>El volumen de agua usada para el proceso productivo de hidrocarburos se calcula como la sumatoria del agua utilizada en los procesos productivos, y el uso doméstico.</p> <p>El cálculo se realiza a partir de los módulos de consumo.</p>

Fuente: Elaboración propia, 2018

Dentro de las mejoras que se proponen a la metodología de IDEAM 2004 para calcular la demanda de agua, está la de Infante Romero & Ortiz, la cual hace referencia a un ajuste metodológico para el cálculo de la demanda en el sector agrícola, como base el Taller de reglamentación de corrientes hídricas” de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca –CVC– (2002) y “los módulos de consumo de agua para los diferentes usos del recurso hídrico”, en la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca –CAR– (2005), se adaptó una nueva ecuación, la cual estima los litros de agua que necesita determinado cultivo por segundo en una hectárea (l/s/ha), mediante la diferencia entre la oferta que en este caso será la precipitación efectiva y la demanda del cultivo y la evapotranspiración.

Nueva demanda por uso agrícola:

$$DUA = [(MR * A * Sm)/1000]$$

Donde: DUA: Demanda uso agrícola (m³/mes), MR: Tipo de Cultivo, A: Área del cultivo y Sm: Segundos del mes.

Esta propuesta a la vez se fortalece con la publicación del EAN 2014 donde igualmente se propone el uso de los módulos de consumo y se hace entrega de un análisis detallado para obtener el cálculo de demanda agrícola y pecuaria, lo cual se explica en el numeral 3.1.2.4.

Algunos de los limitantes encontrados en la metodología IDEAM versión 2004 para el cálculo de la demanda, es la de no actualizar su metodología de cálculo de acuerdo con la actualización de las normas nacionales. Dentro de las mejoras que se espera se apliquen con la nueva publicación del Estudio nacional de Agua es la inclusión del cálculo de la demanda doméstica, con relación a los presentado en la resolución 0330 de 2017, para el cálculo de dotación neta, pérdidas en los sistemas de almacenamiento, tratamiento y distribución de agua.

Otra situación evidenciada, es que hasta la publicación de ENA versión 2014, para el cálculo de la demanda industrial se tiene en cuenta descuentos de uso de agua por procesos de producción limpia, el uso de tecnologías limpias y cambios tecnológicos en las empresas.

2.4 ANÁLISIS DE DEBILIDADES, OPORTUNIDADES, FORTALEZAS Y AMENAZAS (DOFA) A LOS DIFERENTES ENFOQUES DE CALCULO DE LA OFERTA Y LA DEMANDA.


A continuación, se presenta análisis DOFA evaluando los diferentes métodos de cálculo de índice de escasez relacionados en el Capítulo 1.

Con el objeto de fundamentar la toma de decisiones, se construye una matriz DOFA que servirá como una herramienta que ayudara a defina que metodologías internacionales tienen aplicabilidad en el país. Con base en lo anterior, de se construye un DOFA que evalúa la oferta y una DOFA que evalúa la demanda.

Con la matriz DOFA consolidada, el autor propone complementar esta, mediante el uso de una segunda metodología denominada “evaluación por colores de semáforo”; de esta manera con la asignación de colores como verde, amarillo y rojo, se unifica la DOFA no solo para realizar una evaluación cualitativa, sino que además con el uso de colores se logra cuantificar la evaluación.

Finalmente, se concluye sobre los datos obtenidos y se seleccionan las metodologías que se van a aplicar en el estudio de caso.


La metodología de semáforo será aplicada con los siguientes criterios:

 Se asigna el color verde a un índice si cumple con los siguientes criterios:


- Presenta una metodología clara para el cálculo de la oferta y la demanda.
- Puede aplicarse en el país de acuerdo con sus condiciones hidrográficas y usos de recurso.
- Dentro de sus análisis tiene en cuenta los usos (industrial, domestico, agrícola y de servicios).
- Tiene en cuenta el cálculo de caudal ecológico en su metodología.
- Existe un código o programa de fácil acceso y libre utilización para ejecutar el índice.

Nota: Aunque el color verde asignado puede significar que sea sencillo su aplicación, esto no implica que sea el idóneo para una determinada región o lugar. La decisión respecto de

los indicadores o índices que se utilizaran tiene que ser tomada por el consultor y depende de las aplicaciones concretas.

 Se asigna el color naranja a un índice si cumple con los siguientes criterios:






- Presenta una metodología parcialmente clara para el cálculo de la oferta y la demanda.
- Puede aplicarse parcialmente en el país de acuerdo con sus condiciones hidrográficas y usos de recurso.
- Dentro de sus análisis tiene en cuenta alguno de los usos (industrial, doméstico, agrícola y de servicios).
- Se puede ejecutar, aunque hagan falta datos.





 Se asigna el color rojo a un índice si cumple con los siguientes criterios:

- No presenta una metodología clara para el cálculo de la oferta y la demanda.
- No puede aplicarse en el país de acuerdo con sus condiciones hidrográficas y usos de recurso.
- Dentro de sus análisis no tiene en cuenta alguno de los usos (industrial, doméstico, agrícola y de servicios).
- No tiene en cuenta el caudal ambiental en su cálculo.

A continuación, se relacionan los resultados del análisis DOFA aplicados para el cálculo de la Oferta y la Demanda.






Tabla 14 Matriz DOFA de los diferentes métodos para cálculo de la Oferta





Metodología	Aplicabilidad en Colombia	Calculo de Oferta			
		Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
Índice relativo local de uso y re-uso de agua		-Tiene en cuenta el caudal de uso y el de re-uso de la cuenca. -Presenta una metodología de calificación.	-Indicador que se obtiene de manera rápida y entrega un estimativo del estado de cuenca de manera fácil.	-No tiene en cuenta cálculo de caudal ambiental. -No relaciona metodologías para el cálculo hidrológico para el cálculo de la oferta hídrica.	-Indicador que se usa en el estudio nacional de agua 2014. -Su calificación puede ser muy subjetiva
Índice de sostenibilidad de la cuenca		-En su metodología incorpora aspectos hidrológicos, ambientales, de vida y políticos. -Tiene en cuenta para su análisis parámetros físico químicos. -Presenta una metodología de calificación.	-Tiene en cuenta parámetros de económica, institucionales y de educación. -Tiene en cuenta estudios de áreas protegidas de la cuenca. -Metodología de implementación práctica, con asignación de valores para obtener una calificación.	-Modelo diseñado para cuencas con un área máxima de 2500 Km ² -Se debe trabajar con valores registrados en varias fuentes de bases. -Ignora variaciones espaciales de la oferta.	-Su calificación puede ser muy subjetiva - Incluye el análisis de gran número de parámetros y series de registros.
Índice de disponibilidad de agua		-Incluye análisis de variabilidad temporal de la disponibilidad del recurso hídrico.	-Incluye en su balance hídrico el agua subterránea.	-Para este caso específico una debilidad es que use para el cálculo de su balance el agua subterránea. -No tiene en cuenta cálculo de caudal ambiental.	- No se encontró un estudio de caso donde se aplique el método, lo anterior por que el hecho de que tenga en cuenta el análisis de variabilidad temporal de la disponibilidad de agua enriquece esta metodología.
Índice de escasez (Heaps)		-Introduce en su análisis el caudal obtenido por desalinización.	-Indicador que se obtiene de manera rápida y entrega un estimativo del estado de cuenca de manera fácil	-No tiene en cuenta cálculo de caudal ambiental. -Ignora variaciones espaciales de la oferta.	-En Colombia no se ha desarrollado análisis para estimar porcentajes de agua usada por procesos de desalinización.
Índice de estrés Hídrico (WSI)		-Tienen en cuenta en su cálculo el caudal de estiaje que representa entre el 20 y el 50 del caudal. -Presenta una metodología de calificación.	-Indicador que se obtiene de manera rápida y entrega un estimativo del estado de cuenca de manera fácil	-Ignora variaciones espaciales de la oferta.	-Su evaluación puede ser muy subjetiva. -No se encontró el procedimiento que usa para el cálculo de la oferta.

Metodología	Aplicabilidad en Colombia	Calculo de Oferta			
		Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
Índice de Estrés de suministro de agua (WaSSI). Estados Unidos		-Tienen en cuenta en su cálculo el caudal ambiental. -Balance hídrico calculado a escala de tiempo mensual. -Modelo hidrológico en función de la evapotranspiración potencial mensual y precipitación	Incluye algunas metodologías de cálculo para obtener la oferta.	-Para este caso específico una debilidad es que use para el cálculo de su balance el agua subterránea.	Para el presente estudio no es aplicable su metodología en la evaluación de los procesos.
Índice de Escasez Israel		-Tienen en cuenta en su cálculo el caudal ambiental -Tiene en cuenta el caudal de aguas subterráneas -Tiene en cuenta el caudal del proceso de desalinización. -Modelo hidrológico en función de la evapotranspiración potencial mensual y precipitación.	-Tiene en cuenta el concepto de reutilización.	-Para este caso específico una debilidad es que use el concepto de desalinización.	-No relaciona metodologías para el cálculo hidrológico para el cálculo de la oferta hídrica. .
Huella Hídrica – Países Bajos		-Tiene en cuenta el uso de caudal ecológico. -Tiene en cuenta para su análisis parámetros físico químicos.	-Tiene en cuenta el concepto de reutilización.	-Incluye el valor de oferta hídrica virtual. -Para este caso específico una debilidad es que use para el cálculo de su balance el agua subterránea.	-No tiene en cuenta estudios de áreas protegidas de la cuenca.
Estudio Nacional del Agua 2014 - Colombia		-Tiene en cuenta el uso de caudales ecológicos -Tiene en cuenta parámetros fisicoquímicos en su evaluación. -Uso de la metodología para cálculos de consultoría en Colombia. -Presenta una metodología de calificación.	-Uso de mayor cantidad de indicadores para la evaluación de oferta y demanda del recurso hídrico.	-No incluye uso de agua desalinizada -Para este caso específico una debilidad es que use para el cálculo de su balance el agua subterránea.	-No establece una metodología específica para el cálculo de la oferta. Solamente menciona el uso del método de Balance Hídrico.

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 15 Matriz DOFA de los diferentes métodos para cálculo de la demanda

Metodología	Aplicabilidad en Colombia	Calculo Demanda			
		Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
Índice relativo local de uso y re- uso de agua		Tiene en cuenta las demandas de los sectores Domestico, Industrial y Agrícola. -Presenta una metodología de calificación.	-Indicador que se obtiene de manera rápida y entrega un estimativo del estado de cuenca de manera fácil	-No se tiene en cuenta el uso de agua Pecuario y de Servicios. -No presenta metodología para obtener los caudales de acuerdo a su uso.	-Indicador que se usa en el estudio nacional de agua 2014 -No incluye metodología de módulos de consumo.
Índice de sostenibilidad de la cuenca		-En su metodología incorpora aspectos hidrológicos, ambientales, de vida y políticos. -Tiene en cuenta para su análisis parámetros físico químicos. -Presenta una metodología de calificación.	- Tiene en cuenta parámetros de economía, institucionales y educación. -Metodología de implementación práctica, con asignación de valores para obtener una calificación.	-Modelo diseñado para cuencas con un área máxima de 2500 Km ²	-Su calificación puede ser muy subjetiva. -No incluye metodología de módulos de consumo.
Índice de disponibilidad de agua		-Incluye análisis de demanda de los sectores doméstico, industrial y agrícola.	-Indicador que se obtiene de manera rápida y entrega un estimativo del estado de cuenca de manera fácil	- No incluye análisis para el sector de servicios y pecuario.	- No se encontró un estudio de caso donde se aplique el método, lo anterior por que el hecho de que tenga en cuenta el análisis de variabilidad temporal de la disponibilidad el agua enriquece esta metodología
Índice de escasez (Heaps)		--Incluye análisis de demanda de los sectores doméstico, industrial y agrícola.	-Indicador que se obtiene de manera rápida y entrega un estimativo del estado de cuenca de manera fácil	- No incluye análisis para el sector de servicios y pecuario.	- No se encontró un estudio de caso donde se aplique el método, lo anterior por que el hecho de que tenga en cuenta el análisis de uso de agua desalinizada enriquece esta metodología.
Índice de estrés Hídrico (WSI)		--Incluye análisis de demanda de los sectores doméstico, industrial y agrícola.	-Indicador que se obtiene de manera rápida y entrega un estimativo del estado de cuenca de manera fácil	- No incluye análisis para el sector de servicios y pecuario.	-Su evaluación puede ser muy subjetiva.

Metodología	Aplicabilidad en Colombia	Calculo Demanda			
		Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
		-Presenta una metodología de calificación.			-No se encontró el procedimiento que usa para el cálculo de la demanda. (extracción)
Índice de Estrés de suministro de agua (WaSSI). Estados Unidos		-Tiene en cuenta análisis de demanda de los sectores industrial, domestico, agrícola, pecuario, minería y energía.	-Se calculan la tasa de flujo de retorno histórica multiplicada por el uso de agua. -Tienen en cuenta perdidas representada en las transferencias de agua entre cuencas.	-No presenta metodología para obtener los caudales de acuerdo a su uso.	-No se encontraron cambios significativos al compararlos con la metodología implementada por el IDEAM. --No incluye metodología de módulos de consumo.
Índice de Escasez Israel		-Se obtiene la demanda agrícola por medio del cálculo de evaporación, transpiración. -El valor de la demanda tiene como referencia el crecimiento de la población. -Tiene en cuenta perdidas en el proceso.	-Incluye el concepto de huella hídrica azul, verde y gris. -Aplicable en todos los sectores productivos.	No tiene en cuenta el sector pecuario y de servicios.	-No se encontró un estudio de caso donde se aplique el método. -No incluye metodología de módulos de consumo.
Huella Hídrica – Países Bajos		-Incluye el concepto de huella hídrica azul, verde y gris.	-Aplicable en todos los sectores productivos.	-Incluye el concepto de agua virtual	-No se encontró un artículo o documento donde se actualice la versión entregada de acuerdo a los nuevos adelantos tecnológicos.
Estudio Nacional del Agua 2014 - Colombia		-Uso de concepto de Huella hídrica azul y verde - Incluye el cálculo de la demanda minera y del sector de hidrocarburo. -Uso de módulos de consumo -Presenta una metodología de calificación.	-Lista las entidades estatales que pude usar de base para obtener datos de consumo de los sectores evaluados -Tiene en cuenta en los procesos de producción más limpia, uso de tecnologías limpias y cambios tecnológicos para el cálculo de la demanda industrial. -Aplicable en todos los sectores productivos.	-Actualizar a resolución 0330 de 2017.	-Debido a que se publica cada cuatro años tiende a no tener actualizaciones recientes.

Fuente: Elaboración propia, 2018

Dentro de la investigación se encontró, que no hay un único índice que sirva para el calcular el indicador de escasez, ya que cada metodología sea aplicada de acuerdo con las características de su país. Es por esto por lo que se encuentra variedad en la aplicación de las metodologías estudiadas. Por lo anterior, lo que se buscara con el presente trabajo es consolidar estas experiencias y buscar cuales de estas pueden ser aplicadas en nuestro país y encontrar la manera de actualizar la metodología ya existente para el cálculo del índice de escasez.

De la matriz elaborada se concluye que las metodologías que más se ajustan y que se podrían aplicar para un estudio de caso en Colombia, son la metodología de *Índice relativo local de uso y re-uso de agua* y el *Índice de Estrés Hídrico*. Además, el autor considera que la metodología "*Índice de sostenibilidad de la cuenca*" igualmente es aplicable en el país, sin embargo, esta requiere de un volumen superior de información para alimentar el modelo.

Por lo anterior, estas tres metodologías se calificaron como las más estructuradas y que en su desarrollo involucran mayor número de variables, lo cual permite que el nivel de detalle de los datos usados mejore y por consiguiente su resultado.

Igualmente, estas tres metodologías serán analizadas para la elaboración de la guía metodología. Aclarando que para la construcción de la guía se usara igualmente lo analizado en el estudio nacional del agua 2014.

Finalmente, consolidada la guía práctica, usando estas cuatro metodologías, se aplicarán a un estudio de caso (Cuenca El Curo). Resultados serán comparados con los resultados que arroje la metodología que implemento el (IDEAM, 2004) para el cálculo de índice de escasez. Lo anterior permitirá establecer diferencias encontradas y concluir si la metodología vigente puede ser objeto de actualizaciones.

Lo anterior permitirá entre otras cosas:

- Constituir una herramienta aplicable a las distintas cuencas del país para valorar el impacto de las medidas planes y/o estrategias implementadas con el objeto de alcanzar Seguridad Hídrica.
- Constituir una herramienta que permite comparar el estado de la Seguridad Hídrica de diferentes cuencas en un momento determinado.
- Proponer alimenta la matriz con información y/o datos de carácter público actualmente disponibles.

- Ser de fácil comprensión, actualizables en el tiempo, fácil aplicación y confiables.

CAPITULO 3

PROCEDIMIENTO PRACTICO PROPUESTO PARA EL CALCULO DE ÍNDICE DE ESCASEZ.

De acuerdo con los resultados del análisis de metodologías usadas para la estimación del indicador de escasez, en el Capítulo 2 se establecieron una serie de recomendación de tipo técnico para la optimización del modelo propuesto por el (IDEAM, 2004). Producto de este análisis se relacionan los procedimientos a tener en cuenta para la estimación del indicador.

3.1 GENERALIDADES

Todo proceso de cálculo debe tener como mínimo una primera etapa de recopilación y análisis de información, una segunda etapa enfocada en conocer la zona de estudio donde se va a desarrollar el trabajo, delimitar claramente los puntos de interés, y el o los métodos de cálculo seleccionados, para finalmente analizar los resultados y llegar a una conclusión sobre el nivel de presión de los recursos hídricos (tercera etapa).

La siguiente tabla presenta una descripción particular de las etapas mencionadas, enfocándola a la aplicación práctica y los objetivos planteados en el presente trabajo, por lo cual se incluye además la etapa de síntesis metodológica y recomendaciones sobre la selección del método de cálculo.

Tabla 16 Etapa y descripción de las actividades - metodología

Etapa	Descripción de Actividad
Recopilación y análisis de información	Esta etapa consiste en la recopilación y análisis de información secundaria a nivel nacional e internacional referente a: -Métodos de cálculo para estimar la oferta superficial -Métodos de cálculo para la estimación de la demanda -Experiencias de cálculo -Marco conceptual -Marco normativo
Cálculo del indicador de escasez.	Para llevar a cabo la aplicación práctica, se procede de la siguiente forma: -Delimitación de la zona de estudio -Caracterización de la zona de estudio -Selección de los métodos de cálculo de oferta

Etapa	Descripción de Actividad
	-Selección de los métodos de cálculo demanda -Validar información de las bases de datos -Cálculo de índice de escasez de acuerdo con la zona de estudio y los métodos de cálculo seleccionados.
Análisis de resultados	Una vez se obtienen los resultados del cálculo, se analizan los mismos y se infiere cuál debe ser índice de escasez calculado más confiable, teniendo en cuenta el contexto de la región de estudio, así como la información usada para estimar el volumen de agua producida y gastada.

Fuente: Elaboración propia, 2018

3.1.1 Recopilación y análisis de información

Esta actividad consistió en contextualizar la temática de índice de escasez a nivel nacional como internacional desde el punto de vista conceptual, normativo y de experiencias, así como reconocer los diferentes métodos de cálculo que existen para su obtención. Lo anterior debido a que se evidenció gran número de publicaciones que buscan establecer mejores metodologías para el cálculo de la oferta superficial y de la demanda en los diferentes sectores productivos.

3.1.2 Cálculo de índice de escasez.

Para este ejercicio en específico se aplicaría el uso de cuatro diferentes metodologías para el cálculo del indicador de escasez, además se aplicarán las mejoras propuestas por otros autores a la metodología actual. Lo anterior busca evaluar usando varios criterios la temática usada para estimar el indicador. A continuación, se relacionan los pasos a implementar al momento de realizar los cálculos del indicador:

3.1.2.1 *Delimitación de la zona de estudio*

En este numeral se identificará el área de influencia de trabajo, para el caso específico se delimita la cuenca objeto de estudio y se determinan valores como su extensión y área. Una vez definido esto, se inicia con la delimitación de las áreas de drenaje. Estas corresponderán a las áreas de drenaje del área hidrológica seleccionada. Estas se numeran para establecer un orden de selección.

3.1.2.2 -Caracterización de la zona de estudio

Dentro de los numerales que se desarrollaran para este numeral se incluyen: Condiciones socio-económicas en el cual se incluyen censos poblaciones y actividades económicas de la zona, información geológica, geomorfología de la zona, características del suelo de la zona, aspectos climáticos, cobertura vegetal y demás capítulos que consideren necesarios para su análisis.

3.1.2.3 -Selección de los métodos de cálculo de oferta

Los resultados de los métodos para el cálculo de la oferta se presentan en la Tabla 11 del presente trabajo. De este resumen, se puede concluir que para el cálculo de la oferta los métodos más usados en Colombia para la estimación de caudales son los métodos indirectos, siendo el método de regionalización de caudales a partir del método de índice de crecientes el más recurrentemente usado. Sin embargo, el uso de la metodología depende en gran medida del de la cantidad de series de caudales medidos de redes hidrometeorológicas.

Por lo anterior para determinar el régimen de caudales en las áreas de drenaje, se calculan los rendimientos medios de caudales y los valores máximos y mínimos para los diferentes periodos de retorno.

Cuando la densidad de la red hidrológica es muy baja para cubrir todas las áreas de drenaje de la cuenca en estudio, se propone el uso de la metodología de transposición de caudales específicos, presentada en el documento "*Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur*" (UNESCO, 1982). Para su aplicación se debe encontrar que la cuenca seleccionada tenga características fisiográficas y de ambiente vegetal similares, con precipitaciones análogas, esto último con el fin de aplicar las formula de la metodología.

Se recomienda como metodología para la estimación de datos faltantes en series temporales diarias la aplicación del método propuesto por (Martinez & Ruiz, 1998).

Para estimar el caudal mínimo esperado para diferentes periodos de retorno, se propone el método propuesto por el Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

La generación de los caudales máximos, se efectúa por el método del Análisis Regional de Frecuencias (ARF). El método de ARF utilizado se denomina índice de crecientes, el cual

extrapola información estadística de eventos de escorrentía para análisis de frecuencia de crecientes, a partir de cuencas instrumentadas, a cuencas no instrumentadas cercanas que posean características hidrológicas similares.

Para calcular los caudales máximos con el método de (ARF) Índice de crecientes, es fundamental seguir los siete pasos que se listan a continuación: (Smith & Velez, 1997):

- Seleccionar las cuencas instrumentadas dentro de la región que tienen características similares a las cuencas no instrumentadas. Aunque la similitud debería incluir características tales como altura promedio, geología, clima, estructura del suelo, entre otras cosas, esta similitud será determinada por los datos de escorrentía en la prueba de homogeneidad.
- Determinar el período de tiempo base que se utilizará en el estudio. En general, este período de tiempo debe ser el período común de registro de las estaciones instrumentadas de la zona de estudio. Desafortunadamente en nuestro medio, cuando se opta por seleccionar un período común de registros, éste resulta siendo muy corto o no existente. Esta limitación obliga en algunos casos a usar como tiempo base el período de registro más largo de las estaciones instrumentadas de la zona de estudio.
- Ajustar distribuciones de probabilidad para los datos de cada estación instrumentada, las funciones usadas fueron: normal, log-normal, pearson III y Gumbel. A cada estación se le asignó las anteriores funciones de densidad de probabilidad y se escogió la de mejor ajuste usando la prueba de bondad de Kolmogorov – Smirnov, esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad empírica $F_o(x_m)$ y la teórica $F(x_m)$.

$$D = \text{máx} |F_o(x_m) - F(x_m)|$$

Con un valor crítico d que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado. Si $D < d$, se acepta la hipótesis nula “La función de distribución de probabilidad es $f(a, b, \dots)$ ”. Esta prueba tiene la ventaja sobre la χ^2 en que compara los datos con el modelo estadístico sin necesidad de agruparlos. La función de distribución de probabilidad empírica se calcula como:

$$F_o(x_m) = 1 - \frac{m}{n + 1}$$

Donde m es el número del dato x_m en una lista de mayor a menor y n es el número total de datos (Aparicio, 1999)

- Estimar la media de los caudales máximos para un periodo de retorno de 2.33 años ($Q_{2.33}$) para cada estación.
- Evaluar la homogeneidad de los registros. La relación entre la creciente de 10 años de período de retorno y la media de los caudales máximos (relación que define el índice de crecientes), es el estadístico que se usará para la medición de la homogeneidad de los registros. Se debe calcular la relación promedio para todas las estaciones instrumentadas que se están usando. Este valor se multiplica por la media de los caudales máximos de cada una de las estaciones, con el fin de obtener los caudales para 10 años de periodo de retorno para cada una de ellas. A partir de la función de densidad de probabilidad de Gumbel para cada una de las estaciones, se determina la probabilidad de no excedencia asociada a cada uno de los eventos obtenidos, con el fin de determinar el periodo de retorno asociado. Estos periodos de retorno deben ser cercanos a 10 años. Si alguna estación muestra periodos de retorno muy alejados de este valor, esto significaría que esa estación debe retirarse del análisis.
- Determinar la relación regional de frecuencias de crecientes. Se debe realizar un análisis de frecuencias a las series de caudales máximos divididos por sus respectivas medias o por el área de la cuenca. La curva resultante es la curva regional de frecuencia que puede ser utilizada para estimar las características de recurrencia de crecientes de una cuenca no instrumentada.

Además, del método descrito, se relacionan los métodos de generalización espacial de la oferta hídrica superficial, como se ha mencionado la aplicación de estos depende en gran medida de la información disponible y características físicas de la cuenca. A continuación, se relacionan su aplicabilidad de formar resumida.

- Métodos Directos - (Relación Área -Caudal).

El objetivo de estos métodos es convertir los caudales, en valores de escorrentía. La escorrentía puede ser expresada en términos de lámina de agua, en milímetros, lo que

permite una comparación rápida con la precipitación y la evapotranspiración que tradicionalmente también se expresan en milímetros. Por lo anterior para usar estos métodos se requiere del uso de series de caudales.

Para estimar el valor promedio, modal y mínimo de los caudales se debe aplicar el análisis estadístico clásico que se usa en los cálculos hidrológicos. Este consiste en la caracterización estadística de la serie de tiempo de caudales y en el ajuste de una curva teórica a la función de distribución empírica que los describe. Por lo general esta función de distribución teórica se busca entre las curvas de la familia de Pearson y en muchos casos en el subgrupo de la curva de distribución de tres parámetros.

Una vez obtenida la escorrentía superficial para todos los nodos de monitoreo es necesario generalizarla para convertirla en un campo continuo sobre el dominio de evaluación. Para lograr este tipo de generalizaciones se aplican los métodos de interpolación, desde el de interpolación lineal hasta los de interpolación óptima.

Estos métodos fueron implementados por primera vez para la descripción de variables hidroclimáticas por Gandin L.S. en 1965, por ello a la metodología de interpolación óptima se le conoce como el método de Gandin para el cual existe un caso particular que deriva en el denominado método de Kriging. La generalización espacial de los valores puntuales de escorrentía a través este método se basa en la caracterización del variograma de los datos de escorrentía. El variograma es una función que representa la relación espacial existente entre los datos de escorrentía a interpolar y muestra los niveles de memoria de la variable a interpolar en relación con la distancia entre los puntos de interpolación. De este modo el primer paso para la generalización consiste en la construcción del variograma empírico, al cual se le debe ajustar un variograma teórico que servirá como base para la interpolación de valores. Existe una gran multitud de modelos teóricos de variograma, entre ellos el lineal, esférico, exponencial, cuadrático, gaussiano, etc. De los modelos de variograma disponibles se escoge aquel que reduce el error cuadrático medio de la interpolación. (Organización de los estados americanos, 2004)

- Métodos Indirectos.

Para aquellos dominios espaciales en los que la densidad de la red de mediciones hidrométricas no es suficiente para aplicar los métodos de interpolación óptima con toda su rigurosidad es posible seleccionar cuencas no instrumentadas como nodos ficticios de observación. Para estas cuencas la magnitud de la escorrentía superficial debe definirse por métodos indirectos, ente los que se pueden enumerar los siguiente:

1. Balance hídrico
2. Modelos lluvia – escorrentía.

- Balance hídrico: Para cuencas hidrográficas con un registro de las variables climatológicas e hidrológicas mayor de 10 años, situación está que permite estimar la oferta hídrica media anual. Esta metodología se aplica en cuencas instrumentadas y con un área de drenaje mayor (más de 250 km²); En esta oportunidad se debe contar con muy buenos registros de precipitación, evaporación de tanque y excelentes descripciones de la cobertura vegetal y de los suelos de la cuenca, de tal modo que sea posible aplicar la ecuación del balance hídrico en la forma:

$$Y = X - E \pm \alpha$$

Donde: Y : Escorrentía superficial [mm]; X : Precipitación [mm]; E : Evapotranspiración real [mm]; α : Término residual de convergencia [mm];

La información de precipitación en la cuenca se obtiene de la red de estaciones meteorológicas instaladas en la cuenca. Dentro de los métodos más usados para el cálculo de la precipitación se resaltan (promedio aritmético, Polígonos de Thiessen y Curva Isoyetas)

La evapotranspiración real puede ser definida utilizando la evaporación de tanque multiplicada por un coeficiente de transición. Por otra parte, la evapotranspiración puede ser definida en función de la evaporación potencial en el área de estudio. Existe una gran variedad de métodos para la definición de la evapotranspiración potencial y real, entre ellos se pueden enumerar los siguientes métodos: el de

Budyko, el de Kristensen y Jensen (Kristensen y Jensen, 1994) el de Turc, el de Thornthwaite y Mather, el de Penman. Para más información consulta la guía metodológica para la elaboración de balance hídrico de América Latina.

- Relación lluvia-escorrentía: Aplicable en cuencas menores, es decir cuyas áreas de drenaje sean inferiores a 250 km², cuencas no instrumentadas y en consecuencia no cuentan con registros de caudal para la estimación de la oferta superficial mensual. Dentro los métodos más usados para su cálculo se encontraron (Número de curva CN, Clasificación hidrológica de suelo, Uso y tratamiento de suelos, Condición hidrológica de suelos y Condición hidrológica antecedente).

Dentro de las recomendaciones para el cálculo de la oferta, es necesario tener en cuenta los hallazgos encontrados que mejoran la confiabilidad del resultado, dentro de los cuales están:

- Para el uso del método de áreas hidrológicas homogéneas, se sugiere calcular el caudal modal (caudal de mayor probabilidad de ocurrencia durante el año) usando los caudales medios mensuales multianuales. Usar el valor modal de los caudales y no su promedio.
- Para realizar el cálculo considerar el uso de datos totales anuales. Lo anterior teniendo en cuenta que dentro de un año hay meses más secos que otros y meses con más demanda de agua que otros.
- Para el cálculo de interpolación, inicialmente se calcule el error absoluto de los métodos de interpolación para lámina modal y de estiaje. Indicando que con esto se encontrara el método más confiable. Dentro de los métodos propuestos en su estudio se resaltan los de: a) Kriging, b) Spline y c) Inverse Distance Weighted (IDW). La propuesta se materializa con el uso de la siguiente fórmula:

$$E = \sum_{i=0}^n |R_i - M_i|$$

Donde: E: Error absoluto para cada método de interpolación, Ri: Valor real capturado por la estación analizada y Mi: Valor obtenido por interpolación mediante cada uno de los métodos.

- Para el cálculo del caudal ecológico

Dentro de los métodos encontrados para su estimación se destacan metodologías de tipo hidráulicas e hidrológicas.

Los métodos de valoración hidráulica consideran la relación entre el caudal y las características físicas del cauce en el cual se desarrollan una serie de interacciones entre el medio biótico y abiótico y que configuran el ecosistema existente. Dentro de las relaciones que se estudian entre el caudal y las características físicas del cauce se encuentran el perímetro mojado (P), la velocidad (V) y la profundidad de la lámina de agua (Y), el sustrato, la cobertura vegetal, entre otras. Los métodos de valoración hidráulica se basan en el estudio de una o más secciones transversales del cauce bajo estudio. (Consuegra, 2013)

Los métodos clasificados como hidrológicos permiten calcular el caudal ecológico a partir del tratamiento de series de registro hidrológico de las cuales se establecen porcentajes de caudal, se determinan índices, se opta por un caudal calificado o establecido previamente como normativo o se calcula a partir de recomendaciones ya establecidas; se recomienda que las series de registro no tengan extensiones inferiores a 20 años y en la medida de lo posible que sean superiores a esta cifra. (Consuegra, 2013).

El método empleado en la metodología IDEAM para el cálculo de índice de escasez; Resolución 865 de 2004, sugiere realizar la estimación de un caudal ecológico constante, aplicando un porcentaje de descuento o porcentaje del caudal medio mensual multianual más bajo. Este porcentaje es del 75%.

ENA 2010, (Instituto de Hidrología M. y., 2010) establece el caudal ecológico como el caudal medio diario promedio de 5 a 10 años cuya duración es igual o mayor del 97.5%, que se comprueba corresponde a un tiempo de retorno (Tr) de 2.3 años.

ENA 2014, (Instituto de Hidrología M. y., 2015) establece dos grupos de cuencas, a las cuales se les calculara el caudal ambiental de la siguiente manera:

1. Cuencas con autorregulación alta y poca variabilidad de caudales diarios, en que se considera representativo el valor característico Q85 de la curva de duración (caudal igualado o superado el 85% del tiempo), este valor característico se aplica a estaciones

con un índice de regulación hídrica (IRH) igual o superior a 0.70 (alta retención y regulación).

2. Estaciones con valores del IRH inferiores a 0.70, para las cuales se asigna el valor característico Q_{75} de la curva de duración de caudales medios diarios.

La curva de duración de caudales medios diarios del respectivo año se debe ordenar ordenan de mayor a menor y a cada caudal se le calcula su probabilidad de permanencia Di durante el año con la ecuación:

$$Di = \frac{m}{n+1} * 100$$

Donde: m = es la posición del caudal diario en la serie ordenada de mayor a menor. n = es el número de días del año que se analiza.

- Reducción por calidad de agua.

El método empleado en la metodología IDEAM para el cálculo de índice de escasez; Resolución 865 de 2004, sugiere que una vez se conozca el estado de la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento como de los cuerpos de agua, la oferta hídrica de estos sistemas se debe afectar por el 25%, correspondiendo a la condición de calidad del agua.

Para definir R_e se construye la curva de densidad probabilística (CDP) de los caudales de estiaje Q_{min} . De esta curva se extrae el caudal de estiaje con el 97.5% de probabilidad de excedencia $Q_{min 97.5\%}$ de modo que la reducción para mantener el régimen de estiaje de la fuente sería igual a:

$$R_e[\%] = 100 * \frac{Q_{min 97.5\%}}{Q_0}$$

La definición del factor de reducción para protección de fuentes frágiles es una función de las magnitudes del valor modal de la esorrentía (Q) su coeficiente de variación (C_v), su coeficiente de asimetría (C_s) y de la persistencia (D) de los caudales diarios expresada a través de la memoria de la función de autocorrelación de los caudales diarios de la fuente abastecedora. De este modo la mayor reducción para protección de fuentes frágiles la obtendrán aquellas corrientes en las que el valor modal (Q) tiende a ser el menor de todos los valores modales observados en el dominio de

aplicación del índice de escasez, de igual modo será en aquellas corrientes donde se cuente con grandes coeficientes de variación ($C_v \uparrow$), asimetría negativa ($C_s \ll 0$) y larga persistencia en los caudales diarios (para aquellos casos en que $Q \rightarrow 0$). Para tener una idea de la forma analítica o tabulada de la función $R_{it} = f(Q, C_v, C_s, D)$ es necesario evaluar todos los parámetros independientes en todos los puntos de evaluación del índice de escasez con el fin de realizar una clasificación de todas las combinaciones posibles de (Q, C_v, C_s, D) , que permita distribuir entre ellos valores de reducción desde el 0 hasta el 50% (Instituto de Hidrología M. y., 2010).

El autor (Domínguez, Rivera, Vanegas, & Moreno, 2008), con relación al cálculo de la reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica y propone su estimación a través de un funcional de la forma.

$$R_{it} = f(Q, C_v, C_s, D)$$

“Donde C_v , C_s , D representan los coeficientes de variación y de asimetría de los caudales promedio anuales y el radio de correlación de los caudales diarios”.

La estructura explícita del funcional es de antemano desconocida, por ello como primera aproximación para obtener R_{it} se recomienda aplicar la siguiente tabulación:

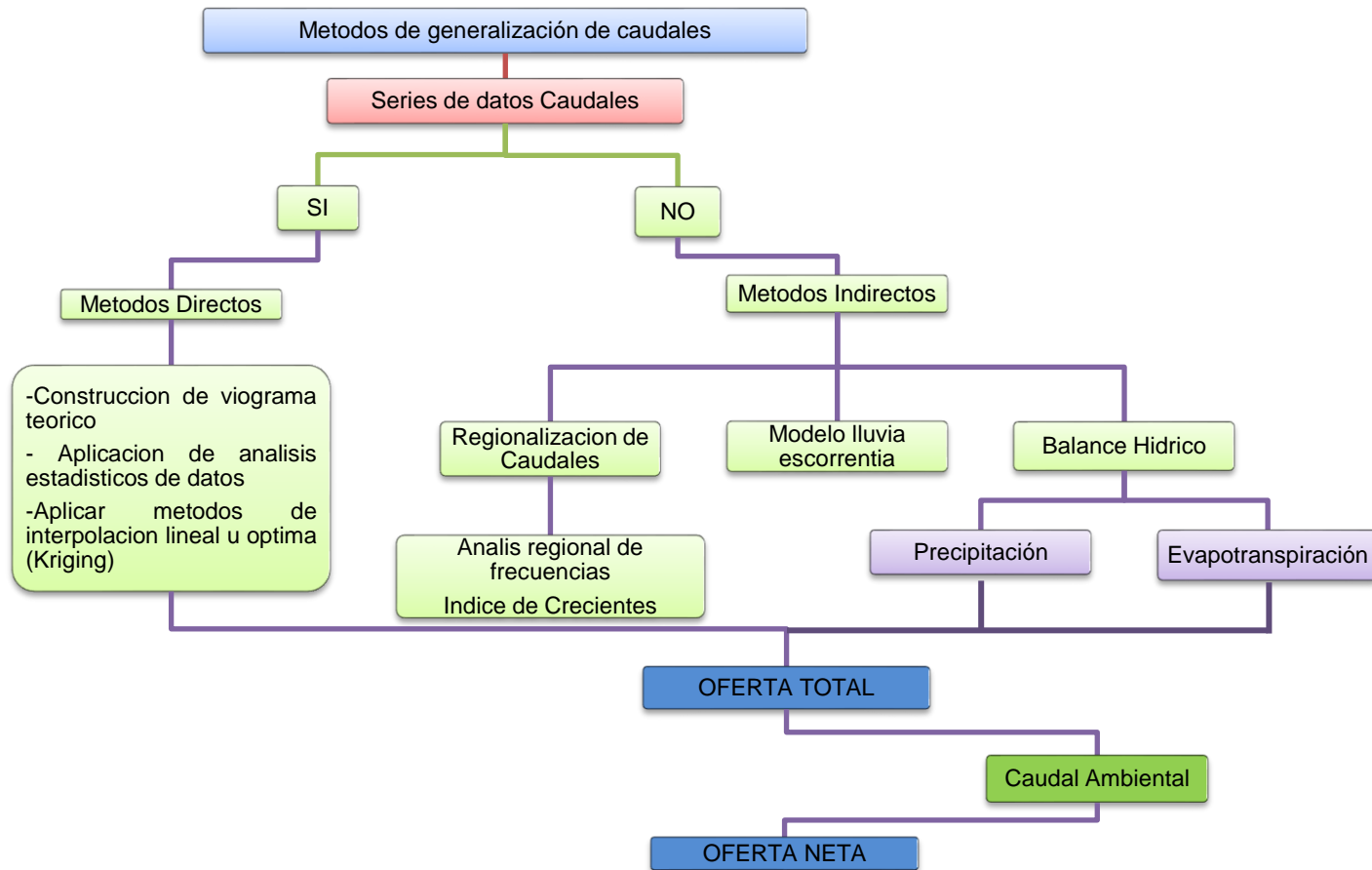
Tabla 17 Escala de reducciones por irregularidad temporal de la oferta hídrica.

C_v	R_{it} , [%]	C_v	R_{it} , [%]	C_v	R_{it} , [%]
0 – 0.2	15	0.3 – 0.4	35	>0.6	50
0.2 – 0.3	25	0.4 – 0.6	40		

Fuente: (Domínguez, Rivera, Vanegas, & Moreno, 2008)

A continuación, se genera diagrama de flujo para determinar la oferta hídrica superficial.

Figura 1 Diagrama de flujo para determinar la oferta hídrica superficial



Fuente: Elaboración propia, 2018

3.1.2.4 -Selección de los métodos de cálculo de la demanda

Para el cálculo de la demanda hídrica total, es necesario estimar el volumen de agua utilizada para los diferentes usos: doméstico, servicios, agrícola, industrial y caudal de retorno. De acuerdo con lo expuesto en la Tabla 13, fueron varias las metodologías que en la actualidad se usan para realizar este cálculo. A continuación, se describen las principales estrategias para tener en cuenta al momento de estimar la demanda de agua en los diferentes sectores económicos.

Demanda uso doméstico: Definido el área de influencia directa del estudio, se identificarán las poblaciones que componen estas áreas. Tomando como base los censos realizados por el país DANE, se identificarán el número de pobladores del área urbana y rural de los municipios. Otra fuente de información que puede ser usada es la registrada en la secretaria de planeación de cada municipio, información que reporte el SISBÉN y finalmente la población que pueda soportar la empresa de servicios públicos del sector estudiado y la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

Obtenida esta información, se calcula la dotación para consumo humano, para esto se debe tener en cuenta lo estipulado por el la Reglamentación Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS 2000-(Resolución 2320 de 2009 MAVDT) y la Resolución 0330 de 2017, que define la metodología de cálculo de la dotación así: La dotación neta debe determinarse haciendo uso de información histórica de los consumos de agua potable de los suscriptores, disponible por parte de la persona prestadora del servicio de acueducto o, en su defecto, recopilada en el Sistema Único de Información (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD).

Finalmente se deben tener en cuenta las pérdidas por aducción y conducción que pueda tener el sistema de acueducto. Esto permitirá obtener la dotación bruta.

Demanda uso industrial: Para estimar el uso industrial, se debe cuantificar y analizar detenidamente la dotación industrial de acuerdo con las características de dichos establecimientos. Para la estimación de este caudal se sugiere consultar la base de datos del registro único ambiental (RUA) el cual registra el uso de agua en las industrias grandes, medianas y pequeñas. Además, esta información los consumos se puede complementar con el uso de los datos registrados por el concepto de cobro de la tasa de uso de agua, esta información reposa en cada una de las corporaciones ambientales departamentales.

Así mismo se puede consultar la base de datos de la captura del Sistema Único de Información SUI donde se puede estimar el consumo de agua reportado por los suscriptores clasificados como industriales.

De igual forma en el peor escenario se sugiere el uso de las tablas relacionada en el anexo uno de la resolución 865 de 2004, donde se muestran los valores estimados de agua consumida para los diferentes sectores de la industria manufacturera y extractiva. Otras fuentes de consulta pueden ser el *Estudio para la determinación de los Módulos de consumo para Beneficio Hídrico publicado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca* y el *Estudio de demanda y usos del agua, índices de consumo y planes de acción para la implementación de la ley 373 de 1997 en la jurisdicción de Corantioquia Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia*. Para mayor información de estos valores de consumo consultar la fuente (Instituto de Hidrología M. y., 2008).

Demanda por Servicios: Es la cantidad de agua requerida para la prestación de los servicios de los sectores: comercio, financiero, gobierno, hospitalario, hotelero, de transporte (aeropuertos) y educativo (colegios, universidades). Por esta se sigue consultar la base de datos de captura del Sistema Único de Información SUI, donde se recolectan los datos de usuarios y usos. Esto se puede complementar con la información de captaciones que registran las Corporaciones autónomas regionales.

Otra fuente de información, son los registros del Ministerios de Salud, Educación y Comercio e Industria y Turismo, donde se obtienen los datos de camas de hospitales, habitaciones hoteleras, estudiantes matriculados en educación básica y universitaria en todas las jornadas para los programas de pregrado y postgrado. Finalmente se deben tener en cuenta las pérdidas desde la captación, transporte y distribución del servicio de agua potable.

Demanda uso agrícola: Cuando la precipitación es mayor al uso consuntivo del cultivo (ETP* kc), el agua proveniente de la precipitación es suficiente y no da lugar a déficit de agua, por tanto, el valor de la demanda agrícola se asume igual a 0. Así mismo, si la precipitación es menor al uso consuntivo del cultivo, la demanda por uso agrícola está representada por el valor absoluto de dicha diferencia.

Conforme a lo anterior, para el cálculo de uso agrícola se sugiere utilizar la metodología propuesta por la FAO, a partir del método de **Penman-Monteith**

(Serie de Riego y Drenaje); en este, los efectos del tiempo atmosférico son incorporados en la ETp, y las características del cultivo y los efectos promedio de la evaporación del suelo en el coeficiente Kc. La variación del coeficiente Kc a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo. Para describir y construir la curva, es necesario conocer tres valores de Kc: 1) los correspondientes a la etapa inicial (Kc ini), 2) la etapa de mediados de temporada (Kc med) y 3) la etapa final (Kc fin). A partir de la curva del coeficiente del cultivo se puede determinar el valor de Kc para cualquier periodo, en forma gráfica o numérica. Una vez determinados los valores de Kc, la evapotranspiración del cultivo (ETc) puede ser calculada multiplicando los valores de Kc por los valores correspondientes de ETp. (Instituto de Hidrología M. y., 2010).

$$ETc = Kc * ETp$$

Donde:

ETc: evapotranspiración del cultivo [mm d⁻¹], Kc: coeficiente del cultivo [adimensional] y ETp: evapotranspiración del cultivo de referencia [mm d⁻¹].

$$Kc_i = Kc_{prev} + \left[\frac{i - \sum(L_{prev})}{L_{etapa}} \right] * (Kc_{prox} - Kc_{prev})$$

Donde

Kc_i : coeficiente del cultivo para el día i.

i: número del día dentro de la etapa de crecimiento [1-duración de la etapa de crecimiento].

L_{etapa} : duración de la etapa considerada [días].

$\sum(L_{prev})$: suma de las duraciones de las etapas previas [días].

Una vez conocido el uso consuntivo, se establece la *precipitación efectiva* (precipitación disponible), que explica el valor de la precipitación final luego de que, al volumen precipitado, se le descuenta el valor de infiltración y evaporación. Matemáticamente, se obtiene multiplicando la precipitación (mm) y el coeficiente de escorrentía. El coeficiente de escorrentía se obtiene como el cociente entre la escorrentía y la precipitación (ambas expresadas en altura de agua). Esta operación estima el valor máximo de caudal de escorrentía provocado por lluvia como el producto de la superficie de cuenca, un valor

máximo de intensidad de lluvia y un factor de escurrentía. Conociendo estos dos valores: uso consuntivo y precipitación efectiva, se establece el riego requerido o riego bruto. Esta muestra en esencia la condición de suficiencia o déficit de agua para atender los requerimientos de agua en las diferentes fases del cultivo. Si el uso consuntivo es menor que la precipitación efectiva se asume que no existe necesidad de riego complementario. Por el contrario, si el uso consuntivo es mayor o igual a uno (≥ 1), entonces es necesario suplir el déficit con sistemas de riego. El *riego bruto* se establece mediante la diferencia entre el uso consuntivo del cultivo y la precipitación efectiva (fracción de la precipitación que realmente se pone a disposición de la planta). (Instituto de Hidrología M. y., 2010).

Para consultar los coeficientes de cultivo en sus diferentes etapas de crecimiento, se sugiere consultar la base de datos reportada en el libro “Agrometeorological crop monitoring and forecasting” de los autores M. Frère and G.F. Popov. Publicado en 1979.

Para la estimación de los módulos de consumo, se sugiere el uso del método de balance hídrico. Método que toma en cuenta las siguientes variables: precipitación, evapotranspiración potencial, coeficiente de cultivo, capacidad de campo y el área cultivada de la cuenca. Lo anterior permitirá determinar los caudales mensuales requeridos para el cultivo. Para el cálculo de la precipitación media mensual de la zona de estudio se propone el uso del método de **mapa de isoyetas**, teniendo en cuenta cada una de las áreas de drenaje dentro de las cuencas.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se sugiere usar el **método de TURC**, el cual propone calcular la ETP (mm/mes) para cada mes en función de la radiación solar media del mes ($\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$) sobre una superficie horizontal, la temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$) y una corrección basada en la humedad relativa mensual (%).

Finalmente, para la estimación de la capacidad de campo se sugiere el uso de **fórmula propuesta por Bodman y Mahmud** citada en el texto (Silva, Ponce de León, García, & Durán, 1988).

La información de cultivos se tomó de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia) cuya información tiene como fuente los datos recopilados por las Unidades Municipal de Asistencia Técnica y Agropecuaria (Umata) que por auto declaración entregan los cultivadores. Los valores totales de áreas sembradas se concertaron con el Ministerio de Agricultura y Desarrollo

Rural y el DANE, luego de analizar datos adicionales reportados por los gremios. (Instituto de Hidrología M. y., 2015)

Demanda uso pecuario: Para su estimación, se debe consolidar el consumo de agua por hato (litros de agua/cabeza-día). Esta relación se obtiene consultando las siguientes bases de datos: 1. Censo realizado por el municipio donde se establezca el número de (bovinos, porcinos y aves). 2. Base de datos de gremios y asociaciones de productores, que son validados por el DANE y la Encuesta Nacional Agropecuaria. 3. Publicaciones de Fedegan, en la guía Medidas integrales para el manejo ambiental de la ganadería bovina, y por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), en las guías ambientales. 4. Base de datos de la Dirección de Genética y Tecnología de CIEM Colombia. 5. Demanda de agua en el sector avícola se sugiere consultar los datos del Fondo Nacional Avícola – Fonav.

Para consultar los valores de consumo de agua en la fase de sacrificio y el consumo de agua del animal en el lugar de manejo, se sugiere consultar las publicaciones de la Universidad de la Salle, en el estudio sobre dotaciones de agua en infraestructura de beneficio para el subsector pecuario. (Instituto de Hidrología M. y., 2010)

El cálculo de la demanda pecuaria se obtiene con la estimación de los módulos de consumo aplicados en la cadena de producción. Se agrega así el volumen de agua utilizada en las fases de crecimiento, terminación y de sacrificio, y en los lugares de manejo y beneficio de la población de bovinos, porcinos y aves.

Para su cálculo se sugiere tener en cuenta la siguiente fórmula (Instituto de Hidrología M. y., 2010):

$$Dp = CV + Cs + Cua$$

Donde:

Dp: demanda pecuaria, Cv: consumo vital en la fase de cría, levante y terminación, Cs: consumo en sacrificio y Cua: consumo en lugares de manejo y alojamiento animal

Como complemento a estas alternativas, a continuación, se presentan los resultados de las investigaciones realizadas para establecer el cálculo del consumo de agua en el sector Bovino. El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por medio de la publicación

“Alternativas para enfrentar una sequía prolongada en la ganadería colombiana”, en su Cuarta edición, dispone de una tabla donde se relaciona el Consumo de agua diaria para los bovinos como se relaciona en la tabla No.Tabla 18.

Tabla 18 Consumo diario de agua para Bovinos

Tipo de ganado	Consumo de agua (L/día)
Vaca de ordeño	90 – 115
Toros	60 – 80
Machos y hembras > 2 años	40 – 50
Machos y hembras < 2 años	35 - 45
Terneros < 1 año	20 – 30

Fuente: (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2012)

En (Instituto de Hidrología M. y., 2010) se establece la demanda hídrica en el sector bovino con respecto a su edad y al propósito de producción según los valores teóricos de consumo publicados en la guía de Medidas integrales para el manejo ambiental de la ganadería bovina, publicada por FEDEGAN.

Tabla 19 Demanda sector Bovino

Inventario bovino	Módulo de consumo (L/día- cabeza)	
	ENA	FEDEGAN
Machos y hembras de 0-12 meses	20-30	20- 30
Machos y hembras de 12 -24 meses	45	35- 45
Machos y hembras de 24- 36 meses	80-110	40 – 50
Mayor de 36 meses	80- 115	
Vacas de ordeño	-	90 – 115
Toros	-	60- 80

Fuente: (Instituto de Hidrología M. y., 2010)

La (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2016) realizó el estudio para determinación de los módulos de consumo de agua “Estudio para la determinación de módulos de consumo del recurso hídrico de las 10 cuencas de segundo orden y las ochenta y cuatro cuencas de tercer orden Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR”. En este se evalúa el Módulo agrícola, Módulo Pecuario, Módulo Avícola y Módulo Piscícola. Para el caso específico del módulo Pecuario – Bovino, se relaciona los valores de consumo hídrico para la línea de producción.

Tabla 20 Demanda hídrica Bovino línea de producción.

Línea de Producción	Unidad Animal*/día (L/día)
Cría	10
Levante	22 - 26
Engorde	45
Producción de Leche	70
Estabulados	45

Fuente: (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2016)

Para el caso específico del módulo Pecuario – Porcino, se relaciona los valores de consumo hídrico para la línea de producción.

Tabla 21 Demanda hídrica Bovino línea de producción.

Línea de Producción	Unidad Animal*/día (L/día)
Cría	4
Levante	8
Engorde	12

Fuente: (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2016)

IDEAM propone que el consumo promedio de un cerdo es de 18 litros diarios y está en un rango de consumo de agua entre los 15 hasta los 21 litros por día. Además, tiene en cuenta la cantidad de agua para alojamiento y lavado del animal que sería de 10 y 12,8 litros diarios respectivamente. (Instituto de Hidrología M. y., 2015),

Para el caso específico del módulo Pecuario – Ovino, se relaciona los valores de consumo hídrico para la línea de producción.

Tabla 22 Demanda hídrica Ovino línea de producción.

Línea de Producción	Unidad Animal*/día (L/día)
Oveja seca	3,8
Oveja lactancia	7
Cordero (engorde)	2
Cabra	4,5 - 8

Fuente: (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2016)

Para el caso específico del módulo Piscícola, se relaciona los valores de consumo hídrico para la línea de producción.

- Cría: Inicia con la llegada de las aves hasta las 3 semanas de edad.
- Levante: Esta es la fase de crecimiento, va desde los 5 o 6 hasta las 12 semanas y la fase de desarrollo se da desde las 12 hasta las 22 semanas.
- Engorde: Comprende desde el día 21 hasta el sacrificio, es el proceso completo integrado de la producción de carne. Para este caso se está teniendo en cuenta los procesos con bioseguridad, como patrón que permite establecer unas condiciones básicas de manejo fitosanitario.
- Postura: esta línea de producción está desarrollada por tres etapas; Iniciación, que va desde los 0 hasta las 8 semanas; desarrollo, que va desde el primer día de la novena semana hasta las 16 semanas; y, por último, la fase de producción, que dura

desde la semana 17 hasta alcanzar el 5% de producción. Las gallinas ponedoras tienen un ciclo de vida útil hasta las 72 o 76 semanas.

Tabla 23 Demanda hídrica Piscícola línea de producción.

Línea de Producción	Unidad de producción	(L/día)
Aves (Cría)	100	15
Aves (Levante)	100	20 - 30
Aves (Engorde)	100	25
Postura	100	26

Fuente: (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2016)

En (Instituto de Hidrología M. y., 2010), se relaciona la demanda hídrica para aves en la Fase de cría, levante y terminación. A diferencia de (Instituto de Hidrología M. y., 2015) donde se generaliza el consumo promedio de las diferentes líneas de producción: engorde, postura, levante, postura producción, genética y genética producción a 0,27 L/día.

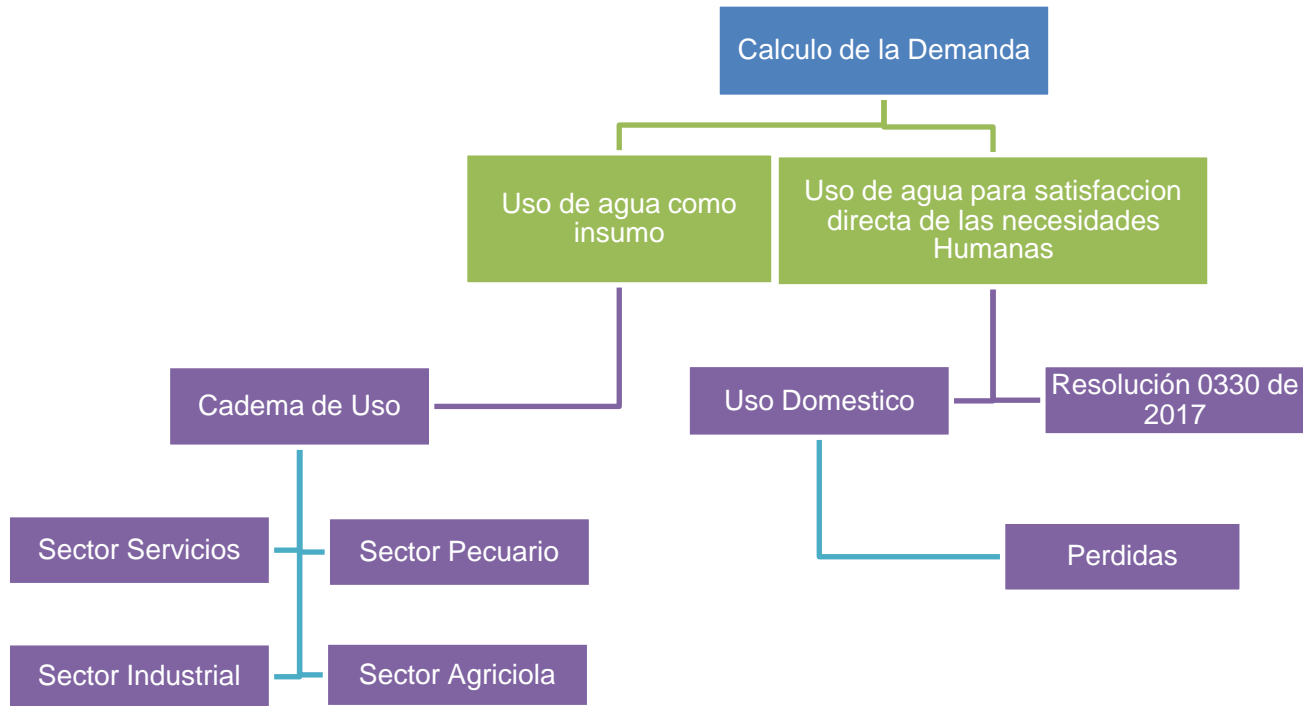
Tabla 24 Demanda hídrica sector aves

Línea de Producción	Módulo de Consumo L/día*100 animales
Pollos y gallinas	240
Patos	370
Pavos	650
Codornices	58

Fuente: (Instituto de Hidrología M. y., 2010)

A continuación, se elabora mapa de proceso para el cálculo de la demanda de agua.

Figura 2 Mapa de proceso para determinar la demanda de agua



Fuente: Elaboración propia, 2018

CAPITULO 4

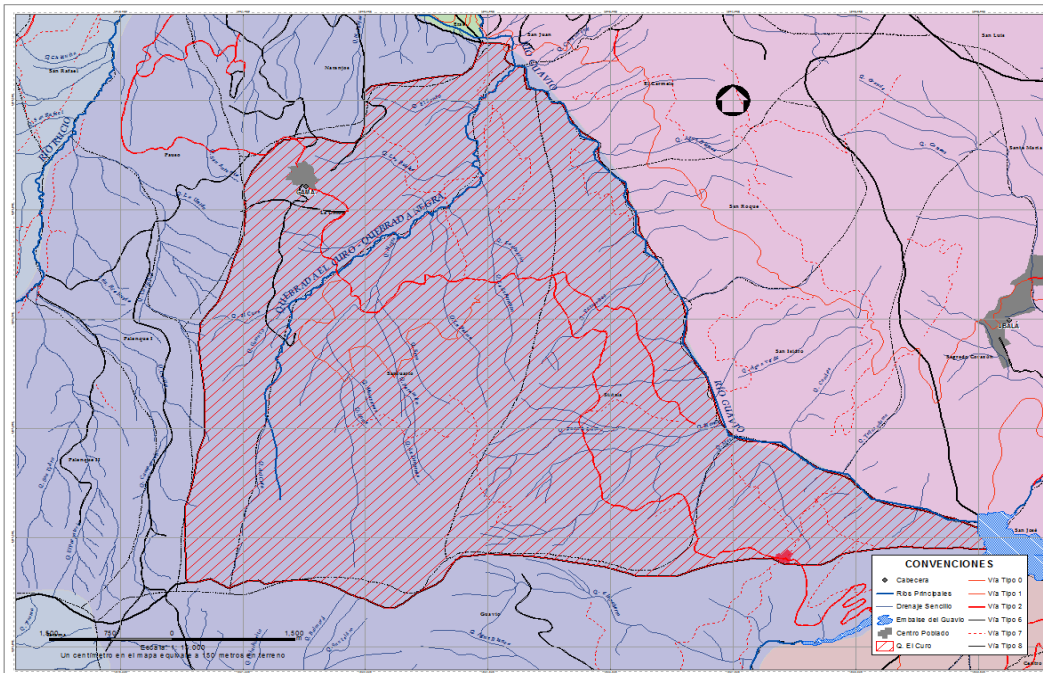
APLICACIÓN PRACTICA DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL CALCULO ÍNDICE DE ESCASEZ.

Producto del análisis realizado en el Capítulo 3, donde se proyecta una metodología para el cálculo de la oferta y demanda. A continuación, se aplican estos pasos en el siguiente estudio de caso.

4.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del Río Guavio se encuentra ubicada en la zona centro occidente de Colombia, en los Departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Limita con los municipios de Guatavita, Machetá, Manta, Somondoco y Almeida del Departamento de Boyacá. Su cuenca comprende once municipios (Gachalá, Guayatá, Gachetá, Ubalá A, Ubalá B, Junín, Guasca, Almeidas, Chivor, Santa Marta y Guatavita) y comprende dieciséis áreas de drenaje. Para el presente trabajo se analizarán los datos del área de drenaje El Cuero con una extensión de 38.12 km² y dieciséis áreas hidrológicas ver Tabla 25, (Guavio, 2015).

Figura 3 Localización área de drenaje El Cuero



Fuente: Corporación Autónoma Regional de Guavio, 2016

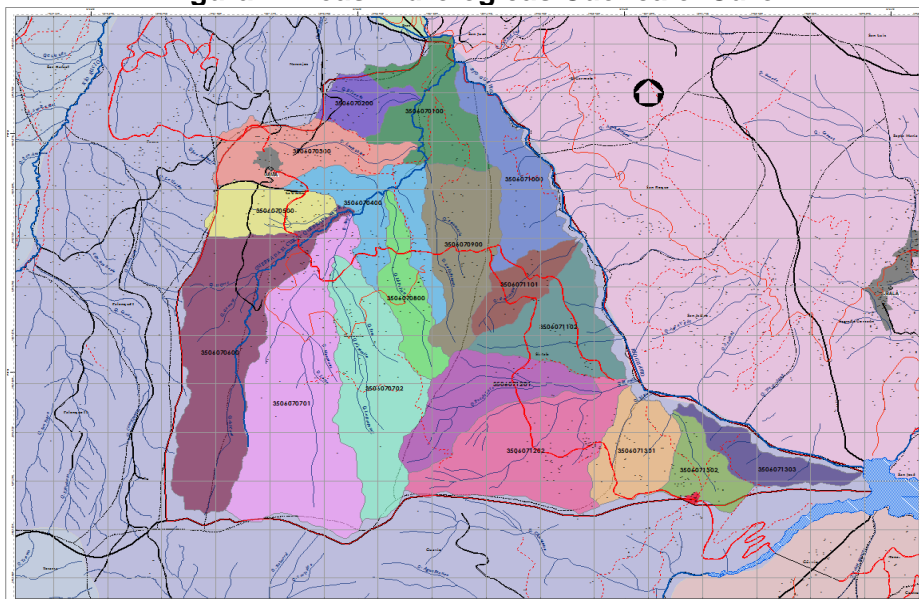
Tabla 25 Áreas Hidrológicas Cuenca el Curo

ID	Nombre o identificación	Código	Área (km ²)
1	Q. Metizo y otros	3506071303	0,99
2	Q. Honda 1	3506071202	3,44
3	Q. Potreritos	3506071102	1,94
4	Q. Negra 1	3506070701	5,40
5	Q. La Palma	3506070800	1,18
6	Rio El Curo Medio	3506070400	1,83
7	Q. La Esperanza	3506070900	2,30
8	Q. Potreritos y otros	3506071101	0,93
9	Rio El Curo Alto	3506070600	4,57
10	Q. Los Robles	3506070300	1,89
11	Q. El Santo	3506070200	0,80
12	Rio El Curo Bajo	3506070100	1,92
13	Directos R. Guavio MD	3506071000	1,90
14	Q Sin Nombre	3506070500	1,17
15	Q. Negra 2	3506070702	3,25
16	Q. Honda 2	3506071201	2,13
17	Q. Metizo	3506071301	1,51
18	Q. Metizo y otros	3506071302	0,97

Fuente: Corporación Autónoma Regional de Guavio, 2016

El área de drenaje El Curo registra un total de 18 áreas hidrológicas, en la Figura 4 se demuestra gráficamente los límites de las mismas, mientras la Tabla 25 presenta la identificación y código asignado para diferenciar cada una de las unidades, así como el área de ellas.

Figura 4 Áreas Hidrológicas Cuenca el Curo



Fuente: Corporación Autónoma Regional de Guavio, 2016

4.2 METODOLOGÍA

La metodología sigue los pasos planteados en el CAPITULO 3

PROCEDIMIENTO PRACTICO PROPUESTO PARA EL CALCULO DE ÍNDICE DE ESCASEZ., específicamente los sustentado en la Tabla 16, de la siguiente manera:

- Recolección de información hidro-meteorológica para cuenca de estudio.
- Estimación de valores faltantes en series.
- Recopilación, análisis y cálculo de oferta.
- Recopilación, análisis y cálculo de la demanda.
- Comparación de índices de escasez de acuerdo con las recomendaciones arrojadas del numeral 2.4.

4.2.1 Recolección de información hidro-meteorológica para cuenca de estudio.

Se selecciono el área de estudio “Cuenca El Curo”, en la cual, no se registran datos de mediciones mediante el uso de estaciones limnométricas y/o limnográfica. En este sentido, para el cálculo de caudales medios, máximos y mínimos se emplea la metodología de transposición de caudales específicos que se expone en el documento (UNESCO, 1982) específicamente en la página 69, en su numeral 3.3.3.3. *“Estimación de caudales en lugares con información insuficiente”*.

Para realizar el cálculo del método de transposición de caudales a cada una de las subcuencas El Curo, se usan los registros de caudal de la estación Limínigráfica “La Boca”, localizada en la Subcuenca Batatas en el Municipio de Gachalá, la cual registra las siguientes características:

Tabla 26 Áreas Hidrológicas Cuenca el Curo

Estación	Corriente	Elevación (msnm)	Latitud	Longitud	Área (km ²)	Tipo	Registro histórico	Código
La Boca	Batatas	1.684	04°42`N	73°28`W	52	LG	1965-2012	3506709

Fuente: IDEAM, 2018

Para la estimación de estos caudales medios mensuales, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Para el uso del método de áreas hidrológicas homogéneas, se calcula el caudal modal (caudal de mayor probabilidad de ocurrencia durante el año) usando los

caudales medios mensuales multianuales. Por lo tanto, usar el valor modal de los caudales y no su promedio.

- Para realizar el cálculo se consideró el uso de datos totales anuales. Lo anterior teniendo en cuenta que dentro de un año hay meses más secos que otros y meses con más demanda de agua que otros.
- Debido a que las precipitaciones medias entre la estación y las subcuencas son un poco diferentes, la metodología propuesta por (UNESCO, 1982), permite el uso de un coeficiente que pondera los diferentes valores de lluvia en las subcuencas.
- Para la selección de la estación homogénea, se tiene en cuenta que las dos cuencas presentan características fisiográficas y de ambiente vegetal similares y precipitaciones análogas. Esto último hace suponer que ambas tienen similar caudal específico.

4.2.2 Estimación de valores faltantes de series.

Para la estimación de datos faltantes en series temporales diarias, se aplica el método propuesto por (Martinez & Ruiz, 1998).

4.2.3 Cálculo de oferta.

4.2.3.1 -Caudales medios mensuales

Tenido en cuenta las consideraciones enunciadas en el numeral 4.2.1, se listan los caudales medios mensuales obtenidos para cada una de las subcuencas del área de drenaje El Curo.

Tabla 27 Valores medios mensuales de caudales generados para subcuenca (m³/seg) de la Quebrada El Curo

CUENCA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Q. Metizo y otros	0,03	0,04	0,07	0,11	0,16	0,21	0,20	0,17	0,16	0,11	0,12	0,10
Q. Honda 1	0,11	0,15	0,26	0,37	0,56	0,71	0,70	0,57	0,57	0,37	0,42	0,35
Q. Potreritos	0,06	0,08	0,15	0,21	0,32	0,40	0,40	0,32	0,32	0,21	0,24	0,20
Q. Negra 1	0,18	0,23	0,41	0,58	0,88	1,12	1,10	0,90	0,90	0,57	0,67	0,54
Q. La Palma	0,04	0,05	0,09	0,13	0,19	0,24	0,24	0,20	0,20	0,13	0,15	0,12
Rio El Curo Medio	0,06	0,08	0,14	0,20	0,30	0,38	0,37	0,31	0,30	0,19	0,23	0,18
Q. La Esperanza	0,08	0,10	0,17	0,25	0,38	0,48	0,47	0,38	0,38	0,24	0,28	0,23
Q. Potreritos	0,03	0,04	0,07	0,10	0,15	0,19	0,19	0,16	0,15	0,10	0,11	0,09
Rio El Curo Alto	0,15	0,19	0,35	0,49	0,75	0,95	0,93	0,76	0,76	0,49	0,56	0,46
Q. Los Robles	0,06	0,08	0,14	0,20	0,31	0,39	0,39	0,32	0,31	0,20	0,23	0,19
Q. El Santo	0,03	0,03	0,06	0,09	0,13	0,17	0,16	0,13	0,13	0,09	0,10	0,08

CUENCA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Rio El Curo Bajo	0,06	0,03	0,06	0,09	0,13	0,17	0,16	0,13	0,13	0,09	0,10	0,08
Directos Guavio	0,06	0,08	0,14	0,20	0,31	0,39	0,39	0,32	0,32	0,20	0,23	0,19
Q Sin Nombre	0,04	0,05	0,09	0,13	0,19	0,24	0,24	0,20	0,19	0,12	0,14	0,12
Q. Negra 2	0,11	0,14	0,25	0,35	0,53	0,67	0,66	0,54	0,54	0,35	0,40	0,33
Q. Honda 2	0,07	0,09	0,16	0,23	0,35	0,44	0,43	0,36	0,35	0,23	0,26	0,21
Q. Metizo	0,05	0,06	0,11	0,16	0,25	0,31	0,31	0,25	0,25	0,16	0,19	0,15
Q. Metizo y otros	0,03	0,04	0,07	0,10	0,16	0,20	0,20	0,16	0,16	0,10	0,12	0,10

Fuente: Elaboración propia, 2018

4.2.3.2 -Caudales mínimos

De acuerdo a lo expuesto en el numeral “3.1.2.3-Selección de los métodos de cálculo de oferta”, para estimar el caudal mínimo esperado para diferentes periodos de retorno, se usó el método propuesto por el Departamento de Geociencias y Medio Ambiente de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Que proponen las siguientes ecuaciones:

$$Q_{min} = \mu_{Qmin} + k_{Tr} * \sigma_{Qmin}$$

$$\mu_{Qmin} = C_{\mu} * Q_{med}$$

$$\sigma_{Qmin} = C_{\sigma} * Q_{med}$$

$$k = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[0.5772 + \ln\left(-\ln\left(\frac{1}{T_r}\right)\right) \right]$$

Donde:

Q_{min} : es el caudal mínimo esperado para un período de retorno dado.

μ_{Qmin} y σ_{Qmin} : son la media y la desviación estándar de los caudales mínimos en función de caudal medio.

C_{μ} y C_{σ} : son valores regionales para la media y la desviación estándar de los caudales mínimos anuales.

Q_{med} : caudal medio de la cuenca

K_{Tr} : factor de frecuencia para la distribución Gumbel que depende del período de retorno (Tr).

De acuerdo a la bibliografía mencionada anteriormente los valores de C_{μ} y C_{σ} , para la zona se toman como: $C_{\mu} = 0,171$ y $C_{\sigma} = 0,071$

Tabla 28 Valores caudales mínimos esperados (m³/seg) para diferentes periodos de retorno en cada subcuenca para la Quebrada El Curo

Caudales mínimos (m ³ /s)						
CUENCA	Periodos de retorno (años)					
	2.33	5	10	25	50	100
Q. Honda 1	0,042	0,032	0,026	0,021	0,018	0,015
Q. Potreritos	0,019	0,015	0,012	0,010	0,008	0,007
Q. Negra 1	0,068	0,052	0,043	0,034	0,029	0,025
Q. La Palma	0,011	0,008	0,007	0,005	0,005	0,004
Rio El Curo Medio	0,015	0,011	0,009	0,007	0,006	0,005
Q. La Esperanza	0,020	0,015	0,012	0,010	0,008	0,007
Q. Potreritos y otros	0,008	0,006	0,005	0,004	0,004	0,003
Rio El Curo Alto	0,059	0,045	0,037	0,030	0,025	0,022
Q. Los Robles	0,015	0,011	0,009	0,007	0,006	0,005
Q. El Santo	0,006	0,004	0,004	0,003	0,002	0,002
Rio El Curo Bajo	0,013	0,010	0,008	0,007	0,006	0,005
R. Curo	0,011	0,008	0,007	0,005	0,005	0,004
Q. Negra 2	0,038	0,029	0,024	0,019	0,016	0,014
Q. Honda 2	0,024	0,018	0,015	0,012	0,010	0,009
Q. Metizo	0,018	0,014	0,011	0,009	0,008	0,007
Q. Metizo y otros	0,012	0,009	0,008	0,006	0,005	0,004

Fuente: Elaboración propia, 2018

4.2.3.3 -Caudales máximos

De acuerdo a lo expuesto en el numeral “3.1.2.3-Selección de los métodos de cálculo de oferta”, la estimación de los caudales máximos, se efectuó por el método del Análisis Regional de Frecuencias (ARF) (índice de crecientes), con base en los registros de caudales máximos instantáneos registrados en las estaciones de la cuenca del río Guavio, complementados con estaciones de cuencas vecinas hidrológicamente afines, las cuales se relacionan en la Tabla 29.

A continuación, se presentan los resultados del cálculo de caudales máximos, para los cual se deben tener en cuenta lo siguiente:

- En cada región los resultados de los análisis de frecuencia de las estaciones pueden ser promediados para representar la frecuencia característica de toda la región (Chow, 1994)
- Para determinar que un grupo de estaciones conforman una región, las estaciones deben cumplir el criterio de homogeneidad, es decir, los cuantiles estimados en todas las estaciones difieren solo por un factor de escala específico de cada zona (Bradley & Zhao, 1997)
- Aplica los siete pasos secuenciales propuestos por (Smith & Velez, 1997).

- Ajustar distribuciones de probabilidad para los datos de cada estación instrumentada, las funciones usadas fueron: normal, lognormal, pearson III y Gumbel. A cada estación se le asignó las anteriores funciones de densidad de probabilidad y se escogió la de mejor ajuste usando la prueba de bondad de Kolmogorov – Smirnov.

A continuación, se listan las estaciones hidrométricas usadas para la aplicación del cálculo (ARF).

Tabla 29 Estaciones Hidrométricas usadas para el cálculo de ARF

Código	Estación	Corriente	Área (km ²)
3506705	Puente Holguín	Guavio	502
3506704	Chusneque	Guavio	559.3
3506701	La Gloria	Negro	76.6
3506703	Ubalá	Chivor	87
3506713	Mundo Nuevo	Rucio	38.4
3510704	Guaicáramo	Upía	7940
3509709	La Reventonera	Upía	911
3506709	La Boca	Batatas	52
3507708	Puente Fierro	Somondoco	531

Fuente: Elaboración propia, 2018

Aplicando el test de Kolmogorov-Smirnov y con un nivel de significancia del 95%; y comprobando que los datos de las estaciones se ajustaron a la función de densidad de probabilidad Gumbel, se obtienen los caudales máximos en función del periodo de retorno. Resultados presentados en la Tabla 30.

Tabla 30 Caudales máximos en función del periodo de retorno (m³/s)

Estación	Corriente	Área	Período de retorno (años)					
		(km ²)	2,33	5	10	25	50	100
Puente Holguín	Guavio	502	203.97	299.03	376.45	474.27	546.84	618.87
Chusneque	Guavio	559.3	393.39	523.75	629.92	764.06	863.58	962.36
La Gloria	Negro	76.6	90.9	144.26	133.23	157.19	174.97	192.62
Ubalá	Chivor	87	80.1	100.3	116.27	136.78	152	167.11
Mundo Nuevo	Rucio	38.4	37.99	57081	68.33	91.01	104.76	118.41
Guaicáramo	Upía	7940	2117.14	2674.37	3128.23	3701.7	4127.11	4549.38
La Reventonera	Upía	911	762.75	1070.52	1321.13	1637.9	1872.8	2106
La Boca	Batatas	52	211.54	305.07	281025	477.5	548.9	619.78
Puente Fierro	Somondoco	531	236.79	275.08	306.27	345.68	374.92	403.94

Fuente: Elaboración propia, 2018

De acuerdo a lo expuesto por (Bradley & Zhao, 1997), se aplica una prueba estadística de homogeneidad, con el objeto de conocer si los caudales de las estaciones hidrométricas agrupadas mantienen entre sí una afinidad hidrológica. Resultados que se presentan en la Tabla 31.

Tabla 31 Evaluación de la homogeneidad de las estaciones seleccionadas

Estación	Área (km ²)	Q _{2.33} (m ³ /s)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₁₀ /q _{2.33}	Q ₁₀ estimado (m ³ /s)	Tr estimado (años)
La Boca	52	211.54	281.25	1.33	333.54	6.4
Mundo Nuevo	38.4	39.8	72.48	1.82	62.75	6.3
Chusneque	559.3	393.39	629.92	1.60	620.27	9.4
La Gloria	76.6	91.69	150.23	1.64	144.57	9
Pte Holguín	502	203.97	376.45	1.85	321.61	6.3
Guaicaramo	7940	2117.14	3128.23	1.48	3338.16	13.9
Reventonera	911	762.75	1321.13	1.73	1202.65	7.4
Pte Fierro	531	236.79	306.27	1.29	373.35	48.2
Ubalá	87	80.1	116.27	1.45	126.30	15.6
				Promedio	1.58	

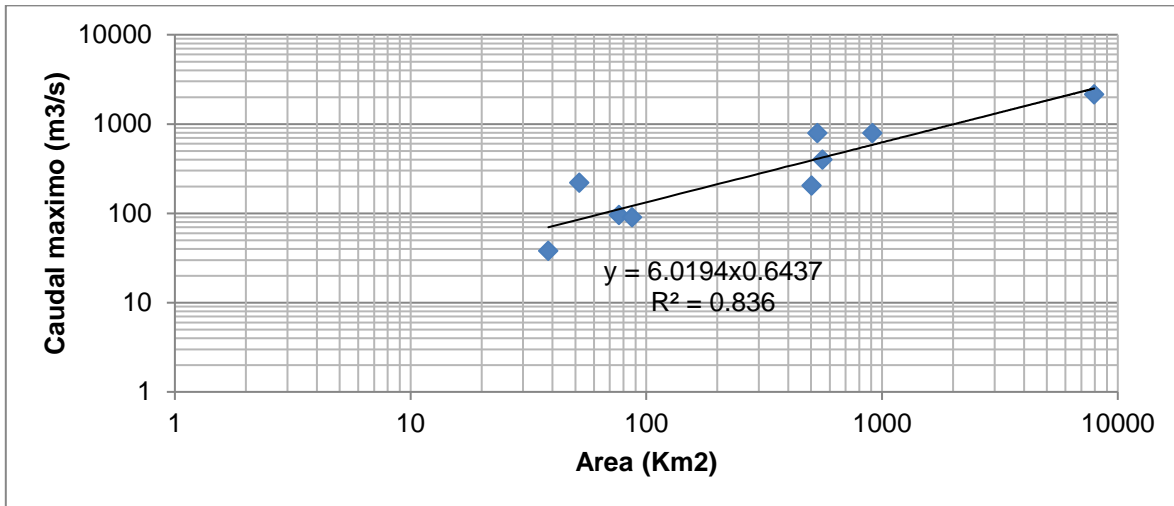
Fuente: Elaboración propia, 2018

De acuerdo con los resultados obtenidos de la prueba estadística de homogeneidad, se comprueba que las estaciones consideradas están dentro de los límites. De esta manera con estos resultados se construirá la curva regional. Al realizar el análisis de relación del caudal medio con el área hidrográfica, se establece que, a partir de la media anual de los caudales máximos de las estaciones agrupadas en la curva regional de frecuencias, es decir las correspondientes a un período de retorno de 2,33 años, se genera la relación funcional de tipo potencial encontrada entre la media de los caudales máximos y el área de cada de la cuenca hidrográfica hasta el sitio de cada estación, resultando un ajuste de tipo potencial con un coeficiente de correlación muy aceptable de 0,836, la cual es descrita por la siguiente ecuación:

$$Q_{2.33} = 6.019A^{0.6437}$$

Dónde: Q_{2.33} = Caudal medio de los caudales máximos anuales, A = Área de drenaje de las cuencas instrumentadas

Figura 5 Relación caudal máximo medio anual (Q_{2,33}) vs Área de Drenaje.



Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 32 Índices de crecientes $Q_{Tr}/Q_{2,33}$ estimados de las cuencas instrumentadas

Tr	La Boca	Mundo Nuevo	Chusneque	La Gloria	Pte Holguin	Guaicaramo	Pte Fierro	Reventonera	Ubala	Promedio
2,33	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
5	1,4	1,5	1,3	1,6	1,5	1,3	1,2	1,4	1,3	1,4
10	1,3	1,8	1,6	1,5	1,9	1,5	1,3	1,7	1,4	1,6
25	2,2	2,4	1,9	1,7	2,3	1,7	1,5	2,2	1,7	2,0
50	2,5	2,7	2,2	1,9	2,7	2,0	1,6	2,5	1,9	2,2
100	2,9	3,1	2,5	2,1	3,0	2,2	1,7	2,8	2,1	2,5

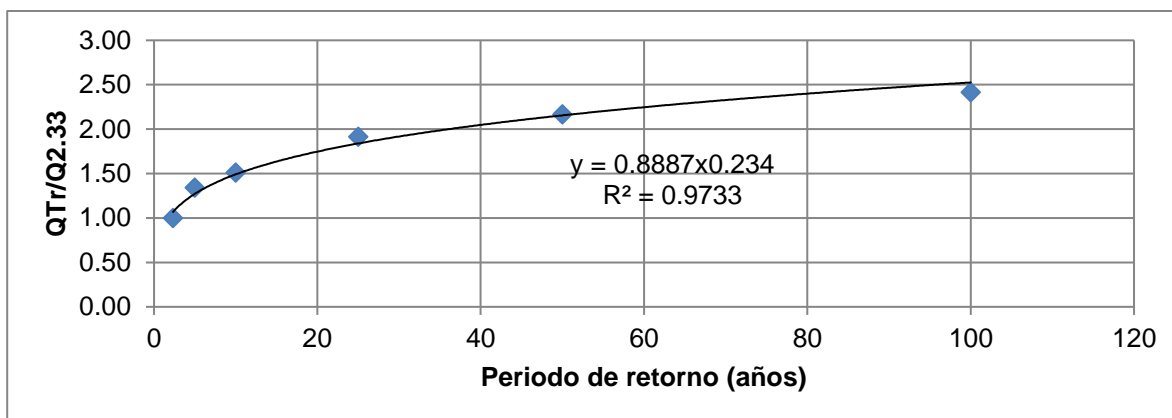
Fuente: Elaboración propia, 2018

La relación funcional entre el índice de crecienta promedio y el periodo de retorno es de tipo potencial y se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_{Tr}}{Q_{2,33}} = 0.8887Tr^{0.234}$$

Dónde: $Q_{Tr}/Q_{2,33}$ = Índice de crecienta y Tr = Período de retorno (años)

Figura 6 Período de Retorno vs Relación caudal máximo medio anual ($Q_{2,33}$).– Curva Regional



Fuente: Elaboración propia, 2018

La curva regional calculada es aplicable a las cuencas en estudio para la obtención de los caudales máximos en las diferentes áreas de drenaje.

De la curva regional de frecuencias se calculó producto del resultado de los valores medios regionales de la relación entre caudales $Q_{TR}/Q_{2,33}$; con esta relación y el caudal medio de 2,33 años, se obtuvo el caudal máximo en las diferentes áreas de drenaje, cuyos resultados que se presentan en la Tabla 33.

Tabla 33 Caudales máximos en (m^3/s) para diferentes periodos de retorno

CUENCA	Periodos de retorno (años)					
	2.33	5	10	25	50	100
Q. Honda 1	13,33	17,27	20,31	25,17	29,60	34,81
Q. Potreritos	9,22	11,94	14,05	17,41	20,47	24,08
Q. Negra 1	17,82	23,08	27,15	33,64	39,56	46,53
Q. La Palma	6,70	8,67	10,20	12,64	14,86	17,48
Rio El Curo Medio	8,88	11,50	13,53	16,76	19,72	23,19
Q. La Esperanza	10,29	13,33	15,67	19,42	22,84	26,86
Q. Potreritos y otros	5,74	7,44	8,75	10,84	12,75	15,00
Rio El Curo Alto	16,01	20,73	24,38	30,21	35,53	41,79
Q. Los Robles	9,07	11,74	13,81	17,12	20,13	23,67
Q. El Santo	5,21	6,75	7,94	9,84	11,57	13,61
Rio El Curo Bajo	9,16	11,86	13,95	17,29	20,33	23,91
R. Curo	6,66	8,62	10,14	12,57	14,78	17,39
Q. Negra 2	12,85	16,65	19,58	24,26	28,53	33,56
Q. Honda 2	9,79	12,68	14,92	18,48	21,74	25,57
Q. Metizo	7,85	10,16	11,95	14,81	17,42	20,49
Q. Metizo y otros	5,90	7,64	8,99	11,14	13,10	15,41

Fuente: Elaboración propia, 2018

4.2.3.4 -Estimación de la oferta neta

Una vez obtenidos los caudales mínimos, medios y máximos, se precede al cálculo de la oferta hídrica neta, para esto se procede a calcular la oferta hídrica neta para dos condiciones hidrológicas:

La primera para un año hidrológico medio, definido por los caudales medios mensuales multianuales de la serie histórica de caudales medios. (Instituto de Hidrología M. y., 2015)

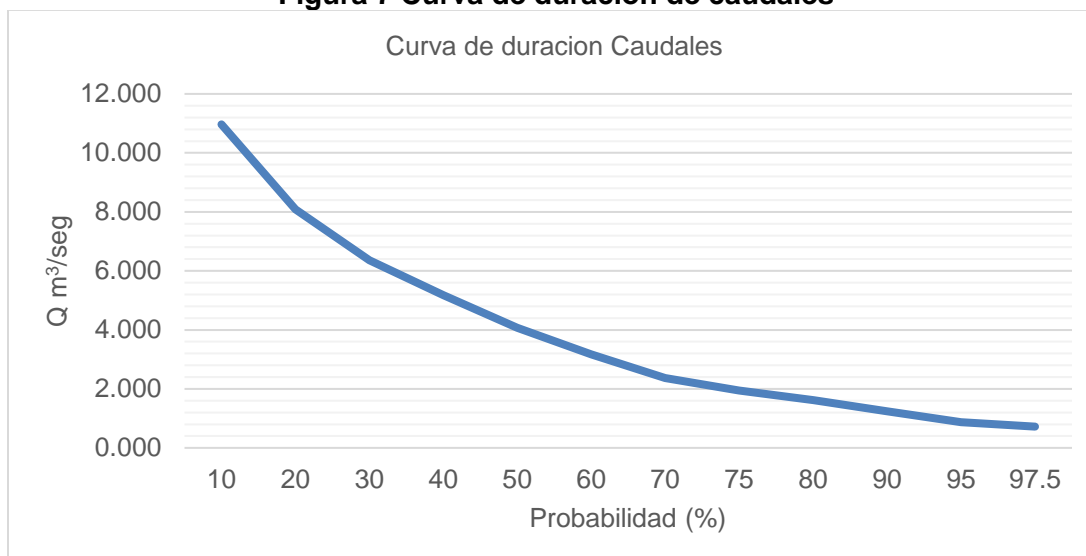
La segunda para un año hidrológico seco, definido como la disminución de la oferta hídrica para año seco respecto al año medio para la zona hidrográfica. (Instituto de Hidrología M. y., 2015). Para el presente estudio se trabaja con el área de drenaje "Orinoco" a la cual pertenece la cuenca El Curo, la cual fue calculada en 39%, por lo tanto, se toma este valor para estimar la oferta hídrica para año seco.

Por otro lado, para obtener el valor de oferta neta, es necesario aplicar la reducción por caudal ambiental. En este sentido, para el presente estudio se aplicarán las conclusiones referenciadas en los numerales (2.3.1 Propuestas de mejoramiento para el cálculo de la oferta) y (3.1.2.3 -Selección de los métodos de cálculo de oferta). Por lo anterior en el cálculo se tendrán en cuenta los siguientes apartes:

- Cuencas con autorregulación alta y poca variabilidad de caudales diarios, en que se considera representativo el valor característico Q85 de la curva de duración (caudal igualado o superado el 85% del tiempo), este valor característico se aplica a estaciones con un índice de regulación hídrica (IRH) igual o superior a 0.70 (alta retención y regulación).
- Estaciones con valores del IRH inferiores a 0.70, para las cuales se asigna el valor característico Q75 de la curva de duración de caudales medios diarios.
- El segundo grupo corresponde a estaciones con valores del IRH inferiores a 0.70, para las cuales se asigna el valor característico Q75 de la curva de duración de caudales medios diarios en la determinación del caudal ambiental.
- El cálculo de estiaje se usarán caudales diarios de la serie histórica. Para construir esta curva los caudales diarios del respectivo año se ordenan de mayor a menor y a cada caudal se le calcula su probabilidad de permanencia durante el año.

Aplicando lo anterior, se presenta la curva de duración de caudales medios diarios. A partir de los datos obtenidos de dicha curva se obtuvo el valor del índice de retención y regulación hídrica (IRH) que sirve de base para la estimación del caudal ambiental.

Figura 7 Curva de duración de caudales



Fuente: Elaboración propia, 2018

Resultado de lo anterior se presentan los resultados de caudales obtenidos para el ejercicio:

Tabla 34 Caudales obtenidos para la estación Boca.

Probabilidad (%)	Caudales característicos (m³/s)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
10	2,57	4,62	7,50	9,88	14,34	16,67	16,70	13,06	10,80	8,07	7,50	5,26
20	2,00	2,67	4,32	7,12	10,17	12,38	12,22	9,98	8,10	6,27	5,30	3,53
30	1,63	1,85	3,34	5,97	8,40	10,31	10,14	8,32	6,55	5,32	4,20	2,81
40	1,40	1,40	2,70	5,11	7,10	9,08	8,96	7,17	5,78	4,70	3,50	2,32
50	1,21	1,14	2,22	4,30	6,12	7,92	7,80	6,32	5,22	4,14	3,00	2,03
60	1,04	0,90	1,77	3,51	5,30	7,08	6,85	5,63	4,67	3,71	2,67	1,73
70	0,80	0,75	1,30	2,83	4,62	6,29	6,11	5,03	4,10	3,35	2,38	1,54
75	0,74	0,70	1,10	2,50	4,35	5,94	5,76	4,72	3,90	3,13	2,22	1,40
80	0,65	0,65	1,00	2,25	3,99	5,60	5,33	4,48	3,68	2,91	2,08	1,25
90	0,46	0,50	0,60	1,85	3,10	4,69	4,30	3,78	3,13	2,52	1,70	0,95
95	0,40	0,34	0,43	1,40	2,30	3,99	3,80	3,37	2,79	2,10	1,47	0,80
97,5	0,32	0,22	0,34	1,10	1,25	3,50	3,42	3,05	2,38	1,85	1,32	0,60

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 35 Caudal ambiental Q_{75} para el área de drenaje de la Quebrada el Curo.

CUENCA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Q. Honda 1	0.05	0.05	0.07	0.17	0.29	0.39	0.38	0.31	0.26	0.21	0.15	0.09
Q. Potreritos	0.03	0.03	0.04	0.09	0.16	0.22	0.22	0.18	0.15	0.12	0.08	0.05
Q. Negra 1	0.08	0.07	0.11	0.26	0.45	0.62	0.60	0.49	0.41	0.33	0.23	0.15
Q. La Palma	0.02	0.02	0.03	0.06	0.10	0.14	0.13	0.11	0.09	0.07	0.05	0.03
Rio El Curo Medio	0.03	0.02	0.04	0.09	0.15	0.21	0.20	0.17	0.14	0.11	0.08	0.05
Q. La Esperanza	0.03	0.03	0.05	0.11	0.19	0.26	0.25	0.21	0.17	0.14	0.10	0.06
Q. Potreritos y otros	0.01	0.01	0.02	0.04	0.08	0.11	0.10	0.08	0.07	0.06	0.04	0.03
Rio El Curo Alto	0.07	0.06	0.10	0.22	0.38	0.52	0.51	0.42	0.34	0.28	0.20	0.12
Q. Los Robles	0.03	0.03	0.04	0.09	0.16	0.22	0.21	0.17	0.14	0.11	0.08	0.05
Q. El Santo	0.01	0.01	0.02	0.04	0.07	0.09	0.09	0.07	0.06	0.05	0.03	0.02
Rio El Curo Bajo	0.03	0.03	0.04	0.09	0.16	0.22	0.21	0.17	0.14	0.12	0.08	0.05
R. Curo	0.02	0.02	0.02	0.06	0.10	0.13	0.13	0.11	0.09	0.07	0.05	0.03
Q. Negra 2	0.05	0.04	0.07	0.16	0.27	0.37	0.36	0.29	0.24	0.20	0.14	0.09
Q. Honda 2	0.03	0.03	0.04	0.10	0.18	0.24	0.24	0.19	0.16	0.13	0.09	0.06
Q. Metizo	0.02	0.02	0.03	0.07	0.13	0.17	0.17	0.14	0.11	0.09	0.06	0.04
Q. Metizo y otros	0.01	0.01	0.02	0.05	0.08	0.11	0.11	0.09	0.07	0.06	0.04	0.03

Fuente: Elaboración propia, 2018

A continuación, se presentan los resultados de oferta hídrica neta integral estimada para las subcuencas para el año hidrológico medio.

La oferta hídrica neta se estimó para dos condiciones hidrológicas así:

- Año hidrológico medio: está definido por los caudales medios mensuales multianuales de la serie histórica de caudales medios.
- Año hidrológico seco: De acuerdo al (Instituto de Hidrología M. y., 2015) (página 78), la disminución de la oferta hídrica para año seco respecto a año medio para la zona hidrográfica del Orinoco a la cual pertenece el área de drenaje de Muchindote es del 39%, por lo tanto, se toma este valor para estimar la oferta hídrica para año seco.

La oferta hídrica se presenta de manera integral de las cuencas de estudio, teniendo en cuenta la distribución de tributarios y la acumulación de los caudales al final de la misma.

Tabla 36 Oferta hídrica neta integral estimada para cada subcuenca en (m^3/s) para año hidrológico medio

CUENCA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Rio El Curo Alto	0.06	0.08	0.07	0.06	0.07	0.20	0.13	0.16	0.15	0.18	0.22	0.19
R. Curo	0.06	0.10	0.07	0.06	0.08	0.20	0.13	0.16	0.16	0.18	0.24	0.21
Q. Negra 1	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03	0.10	0.06	0.09	0.08	0.08	0.11	0.09
Q. Negra 2	0.15	0.23	0.20	0.15	0.16	0.53	0.33	0.43	0.41	0.47	0.61	0.51
Q. La Palma	0.15	0.25	0.20	0.15	0.16	0.53	0.33	0.44	0.42	0.47	0.62	0.52
Rio El Curo Medio	0.15	0.26	0.21	0.15	0.16	0.53	0.33	0.44	0.47	0.47	0.64	0.54
Q. La Esperanza	0.15	0.29	0.29	0.15	0.16	0.53	0.33	0.44	0.42	0.47	0.66	0.58

CUENCA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Q. Los Robles	0.15	0.30	0.22	0.15	0.16	0.53	0.33	0.44	0.47	0.47	0.67	0.60
Q. El Santo	0.15	0.32	0.22	0.15	0.16	0.53	0.33	0.44	0.42	0.47	0.68	0.60
Rio El Curo Bajo	0.15	0.33	0.22	0.15	0.16	0.53	0.33	0.44	0.42	0.47	0.69	0.62

Fuente: Elaboración propia, 2018

A continuación, se presentan los resultados de oferta hídrica neta integral estimada para las subcuencas para el año hidrológico seco.

Tabla 37 Oferta hídrica neta integral estimada para cada subcuenca en (m³/s) para año hidrológico seco

CUENCA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Rio El Curo Alto	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.09	0.05	0.06	0.06	0.07	0.09	0.07
R. Curo	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03	0.09	0.05	0.06	0.06	0.07	0.10	0.08
Q. Negra 1	0.01	0.10	0.02	0.01	0.01	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05	0.04
Q. Negra 2	0.06	0.09	0.08	0.06	0.06	0.27	0.13	0.17	0.16	0.18	0.24	0.20
Q. La Palma	0.06	0.10	0.08	0.06	0.06	0.28	0.13	0.17	0.16	0.18	0.24	0.20
Rio El Curo Medio	0.06	0.10	0.08	0.06	0.06	0.21	0.13	0.17	0.16	0.18	0.29	0.21
Q. La Esperanza	0.06	0.11	0.08	0.06	0.06	0.21	0.13	0.17	0.16	0.18	0.27	0.26
Q. Los Robles	0.06	0.19	0.08	0.06	0.06	0.21	0.13	0.17	0.16	0.18	0.26	0.23
Q. El Santo	0.06	0.12	0.08	0.06	0.06	0.28	0.13	0.17	0.16	0.18	0.26	0.24
Rio El Curo Bajo	0.06	0.13	0.09	0.06	0.06	0.21	0.13	0.17	0.16	0.18	0.28	0.24

Fuente: Elaboración propia, 2018

4.2.4 Cálculo de la demanda

A continuación, se relacionan los cálculos efectuado para calcular de demanda para los usos:

4.2.4.1 -Caudales demanda Agrícola

Para estimar los caudales mensuales agrícolas, se aplica la metodología establecida en el numeral 3.1.2.4 -Selección de los métodos de cálculo de la demanda, donde se plantea el uso de los módulos de consumo, estimados a partir del uso del método de balance hídrico. Método que toma en cuenta las siguientes variables: precipitación, evapotranspiración potencial, coeficiente de cultivo, capacidad de campo y el área cultivada de la cuenca. La precipitación media mensual se calcula a partir de mapas de isoyetas, teniendo en cuenta cada una de las áreas de drenaje dentro de las cuencas. Para el caculo de precipitación se sigue las recomendaciones del numeral en mención y se platea la metodología de TURC. Para obtener los valores de entrada de temperatura se determinó la temperatura media de cada una de las áreas de drenaje a partir del gradiente de temperatura. Los coeficientes de cultivo (Kc) se obtuvieron de las referencias dadas por la FAO, estos valores (Kc) dependen de la época de siembra, además de las prácticas culturales de cada región y está en función

de las épocas de lluvia. Finalmente, la capacidad de campo se calcula con base en la siguiente fórmula (Bodman y Mahmud).

Aplicado lo anterior, se relación los módulos de consumo calculados para cada cultivo:

Tabla 38 Módulos de consumo agrícola

Cultivo	L/s-ha	Ha	Cultivo	L/s-ha	Ha
Pastos	0.045	6,7	Frijol	0.017	2,51
Maiz	0.025	21,6	Arveja	0.020	1,19
Tomate	0.060	2,6	Rosa	0.016	0,05
Caña	0.024	5,7	Café	0.021	6,11
Platano	0.020	3,8	Mora	0.030	2,43
Cebolla	0.019	0,21	Papa	0.056	1,5
Aguacate	0.059	0,02	Yuca	0.064	0,91
Lulo	0.030	7,69	Granadilla	0.062	0,2
Uchuba	0.049	1			

Fuente: (Guavio, 2015)

4.2.4.2 -Caudales demanda Domestica

Para la estimación de la demanda Doméstica, se aplica la metodología establecida en el RAS 2000 mediante Resolución 1096, modificada parcialmente mediante Resolución 0330 de 2017, la cual relaciona el artículo 43 “Dotación neta máxima”. *La dotación neta debe determinarse haciendo uso de información histórica de los consumos de agua potable de los suscriptores, disponible por parte de la persona prestadora del servicio de acueducto o, en su defecto, recopilada en el Sistema Único de Información (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD).* Para el presente ejercicio académico no fue posible obtener registro por parte de la Empresa prestadora de servicios públicos del municipio y veredas. Por tal motivo no fue posible estimar mediante un proceso de análisis de información histórica los consumos de agua potable de los suscriptores del servicio de acueducto de la zona estudiada. Partiendo de la anterior premisa, el cálculo de la dotación neta se calcula con base a lo referenciado en la Resolución 0330 de 2017, de la siguiente manera:

Tabla 39 Valores de dotación neta

Altura promedio sobre el nivel del mar de la zona atendida	Dotación Neta máxima (L/hab*día)
>2000 m.s.n.m	120
1000-2000 m.s.n.m.	130
<1000 m.s.n.m	140

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017)

Para el área de drenaje estudiado, se considera un módulo de consumo correspondiente a (120 litros/hab*día), de acuerdo con la Tabla 39 Valores de dotación neta.

De acuerdo con la capacidad técnica y económica se estima que las pérdidas del sistema deben ser del 25%. Lo anterior teniendo en cuenta el artículo 44 “Dotación Bruta” de la resolución 0330 de 2017, en la cual se indica: “El porcentaje de pérdidas técnicas máxima..., y no debe superar el 25%”. A continuación, se relaciona la ecuación para determinar la dotación bruta.

$$D_{bruta} = d_{neta} / (1 - \%p)$$

Donde: %p es el porcentaje de pérdidas técnicas máximas para diseño.

De acuerdo con lo anterior, el módulo de consumo final para el área de drenaje de Curo es calculado en (150 L/hab*día). Para el presente trabajo se estima una población aproximada de 1596 habitantes.

4.2.4.3 -Caudales demanda sector Servicios

Para el cálculo de módulo de consumo en el sector servicios, se maneja el registro de consumo bruto teórico del sector servicios, relacionado en la resolución 0865 de 2004 publicada por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Tabla 40 Consumo bruto teórico sector servicios

Actividad	L/día
Principales establecimientos	
Hospitales (por enfermo)	400
Mataderos municipales (por cabeza sacrificada)	50
Fuentes publicas	15-20
Establecimientos educativos	
Cafeterías	100
Hospedajes	
Hoteles (por habitación)	500
Casa de huéspedes	200
Fabrics	40
Áreas de descanso en carretera	20
Lavanderías	200
Clubes	
De campo	280
Piscinas	40
Comedor campestre	
Con baño y ducha por persona	75
Con servicio de baño solamente por persona	40

Actividad	L/día
Restaurantes con servicios sanitario por persona	25-40
Trabajadores	
Construcción	150
Diurno (escuela por persona)	60
Mataderos municipales	50
Jardines familiares	6

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2004)

4.2.4.4 -Caudales demanda sector Industrial

Para el cálculo de módulo de consumo en el sector industrial, se maneja el registro de consumo bruto teórico del sector industrial, relacionado en la resolución 0865 de 2004 publicada por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Tabla 41 Modulo de consumo sector Industrial

Código CIU	Actividad económica	m³/tonelada
3111	Matanza de ganado, preparación y conservación de carnes	12,5
3112	Fabricación de productos lácteos	20,9
3115	Elaboración de pescado, crustáceos y otros animales marinos y de agua dulce	1,2
3122	Elaboración de productos alimenticios diversos	8,05
3220	Curtidoras y talleres de acabado	48,4
3221	Industria de la preparación y teñido de acabado	48,4
3231	Fabricación de productos de cuero y sucedáneos del cuero, excepto calzado	0,05
3232	Aserraderos, talleres para trabajar madera	0,005
3560	Fabricación de objetivo de barro, loza y porcelana	0,05
3610	Fabricación de vidrio y productos de vidrio	68
3620	Fabricación de productos de arcilla para la construcción	68
3903	Industrias manufactureras diversas	4,2
3909	Otras industrias manufactureras	4,2

Fuente: (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2004)

4.2.4.5 -Caudales demanda para uso pecuario.

La metodología implementada para el cálculo de los módulos de consumo en el sector pecuario, se relaciona en el numeral 3.1.2.4 -Selección de los métodos de cálculo de la demanda. En la siguiente tabla se contabilizan las especies para cada uso correspondientes al uso.

Tabla 42 Número de especies para el uso pecuario

Tipo	No. de cabezas	Porcentaje
Vacas	862	71,0%
Ternero	52	4,3%
Caballo	49	4,0%

Cerdo	75	6,2%
Ovejas	9	0,7%
Toro	11	0,9%
Yegua	1	0,1%
Aves	155	12,8%
Total	1214	100%

Fuente: (Guavio, 2015)

4.2.4.6 -Resultados de cálculo de la demanda neta

Se estima la demanda hídrica de cada una de las subcuencas. Su estimación parte del uso de las bibliografías encontradas para la estimación de la demanda hídrica para cada uno de los sectores socioeconómicos descritos. En la Tabla 43 y Tabla 44 se relacionan los valores de demanda calculados para cada subcuenca.

Tabla 43 Demanda hídrica total para cada subcuenca en (L/s)

Cuenca	Ene	Feb	Marz	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Rio El Curo Alto	1.53	1.19	0.92	0.50	0.50	0.50	0.50	0.46	0.50	0.50	0.50	0.50	8.12
R. Curo	0.64	0.47	0.48	0.37	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31	0.31	0.31	0.32	4.46
Q. Negra 1	1.43	1.10	0.86	0.52	0.52	0.52	0.52	0.48	0.52	0.52	0.52	0.52	8.05
Q. Negra 2	2.16	1.68	0.99	0.53	0.51	0.51	0.51	0.48	0.51	0.51	0.51	0.51	9.40
Q. La Palma	1.16	0.85	0.67	0.43	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.29	4.95
Rio El Curo Medio	6.22	4.74	3.13	2.21	1.13	0.52	0.52	0.50	0.52	0.52	1.21	1.65	22.87
Q. La Esperanza	8.38	6.01	3.60	2.29	0.64	0.64	0.64	0.62	0.64	0.64	0.64	1.15	25.91
Q. Los Robles	0.51	0.45	0.43	0.39	0.35	0.34	0.34	0.33	0.34	0.34	0.34	0.36	4.52
Q. El Santo	0.20	0.20	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	2.25
Rio El Curo Bajo	0.16	0.13	0.13	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	1.33
Q. Potreritos	0.16	0.11	0.12	0.08	0.06	0.06	0.06	0.08	0.06	0.06	0.06	0.07	0.99
Q. Potreritos y otros	0.45	0.36	0.34	0.30	0.28	0.28	0.28	0.27	0.28	0.28	0.28	0.28	3.65
Q. Honda 1	0.77	0.58	0.36	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	2.75
Q. Honda 2	0.80	0.66	0.50	0.30	0.30	0.30	0.30	0.27	0.30	0.30	0.30	0.30	4.63
Q. Metizo	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	1.96
Q. Metizo y otros	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.33

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 44 Demanda hídrica total por uso de cada subcuenca

Cuenca	Demanda Hídrica Total (m³/s)	Consumo Agrícola (m³/s)	Consumo Pecuario (m³/s)	Consumo Avícola (m³/s)	Consumo Doméstico (m³/s)
Rio El Curo Bajo	0,00204	0,00198	0,00001	0,00000	0,00004
Q. El Santo	0,00138	0,00130	0,00001	0,00001	0,00006
Q. Los Robles	0,00253	0,00237	0,00002	0,00000	0,00014
Rio El Curo Medio	0,00374	0,00329	0,00004	0,00000	0,00019
Q NN 1-MI R. Curo	0,00305	0,00281	0,00002	0,00000	0,00011
Rio El Curo Alto	0,01111	0,00676	0,00405	0,00002	0,00017
Q. Negra 1	0,01204	0,01158	0,00005	0,00005	0,00020
Q. Negra 2	0,00425	0,00388	0,00007	0,00000	0,00017
Q. La Palma	0,00191	0,00181	0,00002	0,00000	0,00007
Q. La Esperanza	0,00641	0,00555	0,00003	0,00009	0,00026
Q. Potreritos	0,00027	0,00021	0,00000	0,00003	0,00003
Q. Potreritos y otros	0,00257	0,00236	0,00002	0,00000	0,00013
Q. Honda 1	0,00350	0,00336	0,00001	0,00000	0,00004
Q. Honda 2	0,00442	0,00423	0,00004	0,00000	0,00011
Q. Metizo	0,00153	0,00147	0,00001	0,00000	0,00006
Q. Metizo y otros	0,00013	0,00012	0,00000	0,00000	0,00001
TOTAL	0,06089	0,05306	0,00441	0,00020	0,00182

Cuenca	Demanda Hídrica Total (m ³ /s)	Consumo Agrícola (m ³ /s)	Consumo Pecuario (m ³ /s)	Consumo Avícola (m ³ /s)	Consumo Doméstico (m ³ /s)
PORCENTAJE	100%	97%	1%	0,001%	2%

Fuente: Elaboración propia, 2018

Lo anterior indica que el 97% de la demanda hídrica calculada corresponde al consumo agrícola. Seguido por el consumo doméstico en una muy menor proporción 2%. Siendo el cultivo del maíz con un total de 21,6 hectáreas, el cultivo más representativo de la región con un porcentaje del (33%), por encima del lulo (12%), caña (8,8%) y pastos (10,43%).

4.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGÍAS PARA EL CALCULO DEL ÍNDICE DE ESCASEZ

Productos de los resultados obtenidos de oferta y demanda para la zona de estudio, se procede aplicar estos resultados en las metodologías a emplear para cálculo de escasez de agua. Metodologías que se seleccionan de la matriz DOFA elaborada en el numeral 2.4.

De la matriz presentada se puede concluir que las metodologías que más se ajustan y que se podrían aplicar para un estudio de caso en Colombia, son la metodología de *“Índice relativo local de uso y re-uso de agua”*, *“Índice de sostenibilidad de la cuenca”* y la de *“Índice de Estrés Hídrico”*, al ser las metodologías mejor estructuradas y que en su desarrollo involucran mayor número de variables, lo cual permite que el nivel de detalle de los datos usados mejore y por consiguiente su resultado.

Productos del cálculo de estas metodologías se espera lograr alcanzar las siguientes metas:

- Constituir una herramienta aplicable a las distintas cuencas del país para valorar el impacto de las medidas planes y/o estrategias implementadas con el objeto de alcanzar Seguridad Hídrica.
- Constituir una herramienta que permite comparar el estado de la Seguridad Hídrica de diferentes cuencas en un momento determinado.
- Estar contruidos preferiblemente con información y/o datos de carácter público actualmente disponibles.
- Ser de fácil comprensión, actualizables en el tiempo, aplicables y confiables.

A continuación, se relacionan los resultados obtenidos de la aplicación de las metodologías seleccionadas para el cálculo del indicador de escasez. Es importante resaltar, que, para poder obtener estos valores, se requiere de la aplicación de la propuesta mostrada en el documento para el cálculo de la oferta y la demanda.

Después de obtener el dato de oferta y de demanda de la zona de estudio, se hace necesario definir la relación porcentual de la demanda de agua en relación con la oferta hídrica disponible. Para lograr esto, es necesario comparar los criterios usados por la metodología escogida. Datos que se presentan a continuación:

Tabla 45 Criterio de calificación del índice de escasez.

Índice WTA		Índice WSI		Índice IUA	
<10%	No estresada	WSI < 0.3	Ligeramente explotado	≤ 1%	Demanda no Significativa
10-20%	Estresada	0.3 < WSI < 0.6	Moderadamente explotado	1% – 10%	Demanda muy baja
20-40%	Con escasez	0.6 < WSI < 1	Altamente explotado	11% – 20%	Demanda Baja
>40%	Con escasez absoluta	WSI > 1	Sobreexplotación	21% – 50%	Demanda Apreciable
				>50%	Demanda Alta

Fuente: Elaboración propia, 2018

Donde WTA hace referencia al Índice relativo local de uso y re-uso de agua, WSI al Índice de estrés hídrico y finalmente IUA al índice de escasez del IDEAM.

Con relación a los criterios de evaluación de las tres metodologías, se relacionan las principales diferencias encontradas:

1. El uso de colores como forma de alerta, en la calificación de la metodología IUA.
2. Los rangos de calificación de las tres metodologías difieren totalmente. WTA es la metodología más estricta al manejar rangos entre el 10% al 40%, seguida de la metodología IUA con rangos entre el 0% y el 50% y finalmente WSI metodología que maneja un rango entre 0% y 100%.
3. La metodología WSI, no maneja un criterio de “no escasez en la cuenca”, siendo su calificativo más positivo el “ligeramente explotado”.

4. La metodología WTA es calificada como las más estricta al calificar “con escasez absoluta” la relación porcentual de la demanda de agua en relación a la oferta hídrica disponible con un rango superior al 40%. Seguida de la metodología IUA que con un valor superior al 50% califica la “Demanda alta”. Finalmente, la metodología WSI, con un valor superior al 60% califica de “Altamente explotado”.

Explicadas las principales diferencias encontradas en los métodos descritos, a continuación, se relación a los resultados de la aplicación de los resultados obtenidos del estudio de caso en cada una de las metodologías seleccionadas para hacer la comparación:

4.3.1 Índice relativo local de uso y re-uso de agua

El índice de reusó de acuerdo a lo expresado en el numeral 2.1.2.1, se estima como el cociente entre el uso total (demanda) sobre la oferta del recurso. Realizado a escala nacional, un país se considera "estresado por el agua" si los retiros anuales están entre 20% y 40% de suministro anual de agua dulce y "severamente estresado" si esta cifra excede el 40%" (ver Tabla 1).

Aplicando los porcentajes, se obtuvieron los siguientes resultados para la cuenca de estudio. El cálculo de la oferta hídrica natural disponible se realiza para condiciones hidrológicas medias y secas con base en las series de caudales medios mensuales y anuales. Las condiciones secas corresponden al año típico seco, construido a partir de los caudales mínimos de las series de los caudales medios mensuales.

Tabla 46 Resultado del cálculo de Índice WTA para cada Subcuencas año hidrológico medio

Cuenca	WTA	Rango	Explicación
Rio El Curo Alto	6,17%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
R. Curo	3,25%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. Negra 1	12,26%	Estresada	La presión de la demanda es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. Negra 2	2,70%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. La Palma	1,40%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Rio El Curo Medio	6,38%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. La Esperanza	7,08%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. Los Robles	1,22%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Cuenca	WTA	Rango	Explicación
Q. El Santo	0,60%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Rio El Curo Bajo	0,36%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 47 Resultado del cálculo de Índice WTA para cada Subcuencas año hidrológico seco

Cuenca	WTA	Rango	Explicación
Rio El Curo Alto	15,83%	Estresada	La presión de la demanda es significativa con respecto a la oferta disponible
R. Curo	8,35%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. Negra 1	31,18%	Con escasez	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
Q. Negra 2	6,93%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. La Palma	3,58%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Rio El Curo Medio	16,37%	Estresada	La presión de la demanda es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. La Esperanza	18,16%	Estresada	La presión de la demanda es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. Los Robles	3,13%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. El Santo	1,55%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Rio El Curo Bajo	0,92%	No Estresada	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Fuente: Elaboración propia, 2018

De la calificación obtenida se puede concluir que las cuencas evaluadas para las dos condiciones hidrológicas, en su mayoría fueron calificadas como “No Estresadas”. Siendo la cuenca Q. Negra la única calificada “Con Escasez”, al tener un resultado de 31,8%, resultado para el año hidrológico seco.

4.3.2 Índice de estrés hídrico

El desarrollo de este método se explica en el numeral 2.1.3.1. A continuación, se relaciona los resultados de la aplicación del método para la cuenca El Curo.

El cálculo de la oferta hídrica natural disponible se realiza para condiciones hidrológicas medias y secas con base en las series de caudales medios mensuales y anuales. Las condiciones secas corresponden al año típico seco, construido a partir de los caudales mínimos de las series de los caudales medios mensuales.

Tabla 48 Resultado del cálculo de Índice de estrés hídrico para cada Subcuencas año hidrológico medio

Cuenca	WSI	Grado	Explicación
Rio El Curo Alto	0,0617	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
R. Curo	0,0325	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Q. Negra 1	0,1226	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Q. Negra 2	0,0270	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Q. La Palma	0,0140	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Rio El Curo Medio	0,0638	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Q. La Esperanza	0,0708	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Q. Los Robles	0,0122	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Q. El Santo	0,0060	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Rio El Curo Bajo	0,0036	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 49 Resultado del cálculo de Índice de estrés hídrico para cada Subcuencas año hidrológico seco

Cuenca	WSI	Grado	Explicación
Rio El Curo Alto	0,158	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
R. Curo	0,084	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Q. Negra 1	0,312	Moderadamente explotado	El grado de escasez de la cuenca es medio
Q. Negra 2	0,069	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Q. La Palma	0,036	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Rio El Curo Medio	0,164	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Q. La Esperanza	0,182	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Q. Los Robles	0,031	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Q. El Santo	0,015	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja
Rio El Curo Bajo	0,009	Ligeramente explotado	El grado de escasez de la cuenca es baja

Fuente: Elaboración propia, 2018

De la calificación obtenida se puede concluir que las cuencas evaluadas para las dos condiciones hidrológicas, en su mayoría fueron calificadas como “Ligeramente explotado”. Siendo la cuenca Q. Negra la única calificada “Moderadamente Explotado”, al tener un resultado de 0,31 resultado para el año hidrológico seco.

4.3.3 Índice de escasez metodología IDEAM

Cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un período determinado (anual, mensual) y unidad espacial de análisis (área, zona, subzona, etc.) en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espaciales.

En sentido estricto el indicador debería considerar la oferta hídrica superficial en forma unitaria.

De acuerdo con los resultados obtenidos del cálculo y demanda para la cuenca de estudios se establece el valor del índice de escasez, aplicándola fórmula establecida en el numeral 2.2.5.2 del presente documento. Lo anterior con el objetivo de definir la relación porcentual de la demanda de agua en relación a la oferta hídrica disponible.

La expresión de cálculo del índice de escasez en su forma porcentual es:

$$I_e = \frac{D_t}{O_n} * 100\%$$

Donde

D_h : Demanda hídrica sectorial

O_h : Oferta hídrica superficial disponible (esta última resulta de la cuantificación de la oferta hídrica natural sustrayendo la oferta correspondiente al caudal ambiental).

$$D_t = D_{ud} + D_{ui} + D_{us} + D_{ua} + D_{up}$$

Donde:

D_{ud} = Demanda de agua para consumo doméstico

D_{ui} = Demanda de agua para uso industrial

D_{us} = Demanda de agua para el sector de servicio

D_{ua} = Demanda de agua para uso agrícola

D_{up} = Demanda para uso pecuario

El cálculo de la oferta hídrica natural disponible se realiza para condiciones hidrológicas medias y secas con base en las series de caudales medios mensuales y anuales. Las condiciones secas corresponden al año típico seco, construido a partir de los caudales mínimos de las series de los caudales medios mensuales.

Los resultados obtenidos del índice de uso de agua para las subcuencas de la Quebrada el Curo se muestran a continuación.

Tabla 50 Resultado del cálculo de Índice de Escasez para cada Subcuencas año hidrológico medio

Cuenca	IUA	Color / Rango	Explicación
Rio El Curo Alto	6,17%	Demanda muy Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
R. Curo	3,25%	Demanda muy Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Q. Negra 1	12,26%	Demanda Baja	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
Q. Negra 2	2,70%	Demanda muy Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Q. La Palma	1,40%	Demanda muy Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Rio El Curo Medio	6,38%	Demanda muy Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Q. La Esperanza	7,08%	Demanda muy Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Q. Los Robles	1,22%	Demanda muy Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Q. El Santo	0,60%	Demanda no Significativa	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Rio El Curo Bajo	0,36%	Demanda no Significativa	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 51 Resultado del cálculo de Índice de Escasez para cada Subcuencas año hidrológico seco

Cuenca	IUA	Color / Rango	Explicación
Rio El Curo Alto	15,83%	Demanda Baja	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
R. Curo	8,35%	Demanda muy Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Q. Negra 1	31,18%	Demanda Apreciable	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
Q. Negra 2	6,93%	Demanda muy Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Q. La Palma	3,58%	Demanda muy Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Rio El Curo Medio	16,37%	Demanda Baja	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible

Cuenca	IUA	Color / Rango	Explicación
Q. La Esperanza	18,16%	Demanda Baja	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible
Q. Los Robles	3,13%	Demanda muy Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Q. El Santo	1,55%	Demanda muy Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Rio El Curo Bajo	0,92%	Demanda no Significativa	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Fuente: Elaboración propia, 2018

De la calificación obtenida se concluye que las cuencas evaluadas para las dos condiciones hidrológicas, en su mayoría fueron calificadas como “Demanda muy baja”. Siendo la cuenca Q. Negra 1 la única calificada “Demanda apreciable”, al tener un resultado de 31% resultado para el año hidrológico seco.

Para la cuenca el Curo se calculó un índice de escasez de 10.53%, indicando esto que la cuenca es calificada con una Sin Escasez., lo anterior teniendo en cuenta una estimación por áreas de drenaje.

Obtenidos los resultados de la evaluación para las tres metodologías, en la siguiente tabla se comparan los resultados, lo anterior permitirá evidenciar las diferencias en las maneras de calificación de cada uno de los métodos, esto, con relación a sus rangos.

Tabla 52 Comparación de resultado del cálculo de Índice de Escasez para cada Subcuencas año hidrológico medio

Cuenca	Valoración	WTA	WSI	IUA
Rio El Curo Alto	6,17%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy Baja
R. Curo	3,25%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy Baja
Q. Negra 1	12,26%	Estresada	Ligeramente explotado	Demanda Baja
Q. Negra 2	2,70%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy Baja
Q. La Palma	1,40%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy Baja
Rio El Curo Medio	6,38%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy Baja
Q. La Esperanza	7,08%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy Baja
Q. Los Robles	1,22%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy Baja
Q. El Santo	0,60%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda no Significativa
Rio El Curo Bajo	0,36%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda no Significativa

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 53 Resultado del cálculo de Índice de Escasez para cada Subcuencas año hidrológico seco

Cuenca	Valoración	WTA	WSI	IUA
Rio El Curo Alto	15,83%	Estresada	Ligeramente explotado	Demanda Baja
R. Curo	8,35%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy Baja
Q. Negra 1	31,18%	Con escasez	Moderadamente explotado	Demanda Apreciable
Q. Negra 2	6,93%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy Baja
Q. La Palma	3,58%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy Baja
Rio El Curo Medio	16,37%	Estresada	Ligeramente explotado	Demanda Baja
Q. La Esperanza	18,16%	Estresada	Ligeramente explotado	Demanda Baja
Q. Los Robles	3,13%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy Baja
Q. El Santo	1,55%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy Baja
Rio El Curo Bajo	0,92%	No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda no Significativa

Fuente: Elaboración propia, 2018

De lo anterior se concluye, que la metodología “Índice relativo local de uso y reusó de agua (WTA)”, presenta una forma de evaluación de la escasez más exigente con relación a las otras metodologías. Lo anterior con relación a los dos siguientes escenarios.

Se observo que la metodología WTA en la De la calificación obtenida se concluye que las cuencas evaluadas para las dos condiciones hidrológicas, en su mayoría fueron calificadas como “Demanda muy baja”. Siendo la cuenca Q. Negra 1 la única calificada “Demanda apreciable”, al tener un resultado de 31% resultado para el año hidrológico seco.

Para la cuenca el Curo se calculó un índice de escasez de 10.53%, indicando esto que la cuenca es calificada con una Sin Escasez., lo anterior teniendo en cuenta una estimación por áreas de drenaje.

Obtenidos los resultados de la evaluación para las tres metodologías, en la siguiente tabla se comparan los resultados, lo anterior permitirá evidenciar las diferencias en las maneras de calificación de cada uno de los métodos, esto, con relación a sus rangos.

1. Tabla 52, califica las cuencas Rio El Curo Medio y Q. La Esperanza como “estresada” mientras que la metodología WSI como “ligeramente explotado” y finalmente la metodología IUA como “Demanda baja”

Se observo que la metodología WTA en la De la calificación obtenida se concluye que las cuencas evaluadas para las dos condiciones hidrológicas, en su mayoría fueron calificadas como “Demanda muy baja”. Siendo la cuenca Q. Negra 1 la única calificada “Demanda apreciable”, al tener un resultado de 31% resultado para el año hidrológico seco.

Para la cuenca el Curo se calculó un índice de escasez de 10.53%, indicando esto que la cuenca es calificada con una Sin Escasez., lo anterior teniendo en cuenta una estimación por áreas de drenaje.

Obtenidos los resultados de la evaluación para las tres metodologías, en la siguiente tabla se comparan los resultados, lo anterior permitirá evidenciar las diferencias en las maneras de calificación de cada uno de los métodos, esto, con relación a sus rangos.

2. Tabla 52, califica la cuenca Q Negra 1 como “Con escasez” mientras que la metodología WSI como “Moderadamente estresado” y finalmente la metodología IUA como “Demanda apreciable”.

En general, se identificó que las metodologías expuestas al largo del documento, manejan diferentes criterios de ponderación para calcular la escasez, encontrando diferencias en la forma de asignar los rangos de calificación.

Con el objetivo de establecer un rango único, que califique la escasez, se opta por generar un rango, que a criterio del autor y teniendo como base las metodologías estudiadas, se pueda sugerir como cambio en la metodología que actualmente maneja el IDEAM.

Este ejercicio nace como una propuesta de mejora a la metodología que actualmente se emplea en el país para medir el índice de escasez.

1. La metodología IDEAM, establece un rango del 0% a 50% para medir la escasez, se considera que este rango es un poco conservador para evaluar la relación que existe entre la oferta hídrica disponible y las condiciones de demanda. Sin embargo, al considerar lo citado en el texto “*Critical Trends Global Change and Sustainable Development, 1997*” es fundamental considerar la clasificación citada por Naciones Unidas en la cual se expresa la relación entre aprovechamientos hídricos como un porcentaje de la disponibilidad de agua. En esta relación cuando los

aprovechamientos representan más de la mitad de la oferta disponible se alcanza la condición más crítica. Por lo anterior se propone modificar la asignación de rangos que establece la metodología IDEAM, pasando de evaluar 5 rangos a solamente 4, esto eliminaría el rango (<1%) (Color azul) el cual califica la demanda como “no significativa”. Ver Tabla 54.

2. Se recomienda ajustar las descripciones usadas para cada rango, de esta manera el mensaje pueda generar mayor alerta. Lo anterior de acuerdo con lo relacionado en la Tabla 54.
3. Finalmente, se recomienda manejar la asignación de un color a cada rango establecido, lo anterior permitirá que visualmente se generen las alertas y se genere una mejor y fácil comprensión del estado de la cuenca estudiada. Ver Tabla 54.

Producto de los análisis realizados, a continuación, se relaciona el criterio de evaluación propuesto para medir el nivel de escasez.

Tabla 54 Categorías e interpretación propuesta para definir el indicador de escasez.

Categoría	Rango	Color/Calificativo	Explicación
Alta	>51%	Escasez Absoluta	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible
Medio Alto	21% – 50,99%	Con Escasez	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
Medio	11% – 20,99%	Con escasez baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
No significativo	0% – 10,99%	Sin escasez	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible

Fuente: Elaboración propia, 2018

En la siguiente tabla comparativa se exponen los rangos que usan las tres metodologías estudiadas y además muestra los rangos de calificación de la propuesta de cambio, permitiendo comparar los criterios que utiliza cada metodología en su evaluación de la escasez.

Tabla 55 Comparación de las categorías para definir el indicador de escasez.

WTA	WSI	IUA	Propuesta
No Estresada	Ligeramente explotado	Demanda no Significativa	Sin escasez
Estresada	Ligeramente explotado	Demanda muy baja	Con escasez Baja

WTA	WSI	IUA	Propuesta
Con escasez absoluta	Moderadamente explotado	Demanda Baja	Con escasez
NA	Altamente explotado	Demanda Apreciable	Escasez absoluta
NA	Sobreexplotación	Demanda Alta	NA

Fuente: Elaboración propia, 2018

Resultado del ejercicio, la propuesta planteada a criterio del autor es más confiable para definir los niveles de abundancia o escasez de la zona de estudio. Es importante aclarar que se mantienen los rangos y colores que establece IDEAM en la Resolución 865 de 2004, mejorando solamente la manera de evaluar el resultado obtenido.

Si bien el índice de escasez da cuenta de los niveles de abundancia o escasez del recurso agua, relacionando la oferta específica con la demanda correspondiente, debe tenerse en cuenta que el abastecimiento de agua para los diferentes usos involucra aspectos como el almacenamiento y transporte del recurso hídrico. Por ello, no necesariamente los altos niveles de escasez en áreas específicas coinciden con problemas graves de abastecimiento de los sistemas, para los cuales se han desarrollado infraestructuras de manejo particulares. (IDEAM, 2004).

Finalmente se relaciona la calificación obtenida al aplicar los rangos propuestos, Ver Tabla 54, en el estudio de caso:

Tabla 56 Resultado del cálculo de Índice de Escasez para cada Subcuencas año hidrológico medio.

Cuenca	Valoración	Propuesta	Explicación
Rio El Curo Alto	6,17%	Sin escasez	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
R. Curo	3,25%	Sin escasez	
Q. Negra 1	12,26%	Con escasez Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Q. Negra 2	2,70%	Sin escasez	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. La Palma	1,40%	Sin escasez	
Rio El Curo Medio	6,38%	Sin escasez	
Q. La Esperanza	7,08%	Sin escasez	

Q. Los Robles	1,22%	Sin escasez	
Q. El Santo	0,60%	Sin escasez	
Rio El Curo Bajo	0,36%	Sin escasez	

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 57 Resultado del cálculo de Índice de Escasez para cada Subcuencas año hidrológico seco

Cuenca	Valoración	Propuesta	Explicación
Rio El Curo Alto	15,83%	Con escasez Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
R. Curo	8,35%	Sin escasez	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. Negra 1	31,18%	Con escasez	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible
Q. Negra 2	6,93%	Sin escasez	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. La Palma	3,58%	Sin escasez	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Rio El Curo Medio	16,37%	Con escasez Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Q. La Esperanza	18,16%	Con escasez Baja	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible
Q. Los Robles	3,13%	Sin escasez	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible
Q. El Santo	1,55%	Sin escasez	
Rio El Curo Bajo	0,92%	Sin escasez	

Fuente: Elaboración propia, 2018

Como resultado de la aplicación de los rangos de calificación propuestos se concluye que la cuenca Q. Negra 1, presenta una escasez que debe alertarse al ente regulador. De esta forma se pueden observar las diferencias que arroja la aplicación de los rangos IDEAM con relación a la propuesta del autor. Ver Tabla 53

Los porcentajes propuestos para evaluar la escasez, fueron construidos mediante la comparación de los rangos que establecen las otras metodologías estudiadas. Este análisis mostró que la asignación de rangos que maneja el IDEAM a criterio del autor es muy lapso. Se observó que, al ser un poco más exigente en la asignación de rangos, se logran generar escenarios donde las alertas pueden llegar a darse de manera más eficaz. De esta manera las entidades encargadas de regular los caudales de demanda y de oferta de una cuenca puedan tomar decisiones más acertadas con relación al estado de la fuente.

Por lo cual se recomienda iniciar estrategias para reducir la escasez de la cuenca con la aplicación de políticas institucionales de conservación de la fuente y uso sostenible de los recursos naturales. Dentro de estas políticas se debe optar por mejorar los criterios de calidad de la fuente, deforestación y uso eficiente del recurso. Igualmente se deben tomar medidas necesarias para que los planes de ordenamiento del uso de los recursos naturales

y manejo sostenible de las cuencas hidrográficas, tengan en cuenta zonas que presentan índices de escasez con niveles preocupantes.

Así mismo, resultado de la evaluación de la DOFA en el presente documento, se encontró que la metodología “Índice de sostenibilidad de la cuenca” es calificada como una herramienta apropiada para calcular el indicador de escasez. Aclarando que esta no es comparable con las anteriormente desarrolladas, ya que involucra en su evaluación criterios enfocados a la gestión y sostenibilidad de las fuentes, dentro de los criterios que evalúa se listan: (Hidrología, Ambiente, Vida y Política).

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, se presentan los resultados de su análisis, aclarando que esta puede ser usada como una herramienta que evalúe los planes de gestionen la fuente hídrica. Se propone implementar esta metodología en cuencas que cuenten con registros calidad de la fuente, índice de presión ambiental, índice de desarrollo humano, uso del agua y capacidad institucional de la fuente etc.

4.3.4 Índice de sostenibilidad de la cuenca

El desarrollo de este método se explica en el numeral 2.1.2.2. A continuación, se relaciona los resultados de la aplicación del método para la cuenca el Curo.

El criterio de evaluación para cada uno de los indicadores fue analizado de acuerdo a la información recolectada de la zona de influencia (Cuenca el Curo), la cual hace parte integral del presente documento.

Tabla 58 Evaluación de los parámetros de presión, niveles y valores

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Valor
Hidrología	$\Delta 1$ = Variación porcentual en la disponibilidad per cápita de la cuenca en los últimos 5 años (m ³ /personal/año)	$\Delta 1 < -20\%$	0,25
		$-20\% < \Delta 1 < -10\%$	
		$-10\% < \Delta 1 < 0\%$	
		$0\% < \Delta 1 < +10\%$	
		$\Delta 1 > +10\%$	
Hidrología	$\Delta 2$ = Variación porcentual en la DBO ₅ de la cuenca en los últimos 5 años	$\Delta 2 > 20\%$	0,25
		$20\% > \Delta 2 > 10\%$	
		$0 < \Delta 2 < 10\%$	
		$-10\% < \Delta 2 < 0\%$	
		$\Delta 2 < -10\%$	
Ambiental	Índice de presión ambiental (EPI) de la cuenca (rural y urbana)	$EPI > 20\%$	0,50
		$20\% < EPI < 10\%$	
		$10\% < EPI < 5\%$	
		$5\% < EPI < 0\%$	

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Valor
		EPI <0%	
Vida/Humano	Variación en el Índice de Desarrollo Humano (HDI) en los últimos 5 años	$\Delta < -20\%$	0,50
		$-20\% < \Delta < -10\%$	
		$-10\% < \Delta < 0\%$	
		$0\% < \Delta < +10\%$	
		$\Delta > +10\%$	
Política	Variación en el Índice de Desarrollo Humano (HDI) en educación en los últimos 5 años	$\Delta < -20\%$	0,50
		$-20\% < \Delta < -10\%$	
		$-10\% < \Delta < 0\%$	
		$0\% < \Delta < +10\%$	
		$\Delta > +10\%$	

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 59 Evaluación de los parámetros de estado, niveles y valores para la Cuenca El Curo.

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Valor
Hidrología	Disponibilidad per capital (WA) de la cuenca (m ³ /persona/año)	WA < 1700	1,00
		1700 < WA < 3400	
		3400 < WA < 5100	
		5100 < WA < 6800	
		6800 > WA	
Hidrología	DBO ₅ promedio de la cuenca (mg/L)	DBO ₅ > 10	0,50
		10 < DBO ₅ > 5	
		5 < DBO ₅ > 3	
		3 < DBO ₅ < 1	
		DBO ₅ < 1	
Ambiental	% del área de la cuenca con vegetación natural (AV)	Av < 5	1,00
		5 < Av < 10	
		10 < Av < 25	
		25 < Av < 40	
		Av > 40	
Vida/Humano	Índice de Desarrollo Humano (HDI) para la cuenca (dando peso de acuerdo con la población del país)	HDI < 0.5	0,25
		0.5 < HDI < 0.6	
		0.6 < HDI < 0.75	
		0.75 < HDI < 0.9	
		HDI > 0.9	
Política	Capacidad institucional de la cuenca en manejo de recursos hídricos (IWRM).	Muy Pobre	0,50
		Pobre	
		Media	
		Buena	
		Excelente	

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 60 Evaluación de los parámetros de respuesta, niveles y valores para la cuenca El Curo

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Valor
Hidrología	Mejora en la eficiencia del uso del agua (últimos 5 años)	Pobre	0,50
		Media	
		Buena	
		Excelente	
	Mejora en tratamiento de alcantarillado / disposición (últimos 5 años)	Pobre	0,50
		Media	
		Buena	
		Excelente	
Ambiental	Evolución en conservación de la cuenca (áreas protegidas) en últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,50
		$-10\% < \Delta < 0\%$	
		$0\% < \Delta < 10\%$	
		$10\% < \Delta$	
Vida/Humano	Evolución del Índice de Desarrollo Humano (HDI) de la cuenca en los últimos 5 años	$\Delta < -10\%$	0,50
		$-10\% < \Delta < 0\%$	
		$0\% < \Delta < 10\%$	
		$10\% < \Delta$	
Política	Evolución de los gastos en la Capacidad institucional de la cuenca en manejo de recursos hídricos (WRM) de la cuenca en los últimos 5 años.	$\Delta < -10\%$	0,50
		$-10\% < \Delta < 0\%$	
		$0\% < \Delta < 10\%$	
		$10\% < \Delta$	

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 61 Valores de indicadores e índice de sostenibilidad de la cuenca, año seco y medio.

Indicador	Valor
H	0,5
A	0,66
L	0,42
P	0,5
WSI	0,52

Fuente: Elaboración propia, 2018

Una vez obtenido el valor final del WSI, se puede concluir que la cuenca El Curo es calificada con una sostenibilidad intermedia ya que su rango oscila entre 0.5 y 0.8.

Las mayores fortalezas se relacionaron con los indicadores ambientales, mientras que las mayores debilidades observadas se relacionaron con el indicador humano. Dentro de los rangos medios fueron calificados el indicador de Hidrología y Política, la primera relativa a cantidad debido principalmente a la situación de no escasez hídrica y la segunda con la evolución en la capacidad institucional para el manejo de los recursos hídricos.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

- El presente documento, contiene un análisis bibliográfico para conocer metodologías que estimen el Indicador de Escasez Hídrico. Resultado de este análisis, se determina que la resolución 865 de 2004 se encuentra desactualizada, y requiere de actualizaciones para poder estimar la oferta y la demanda. Por lo anterior, se propone una guía práctica para su estimación y además se sugiere un ajuste en los rangos para calcular el indicador de escasez. Generando una herramienta optimizada de alerta temprana aplicable a futuros estudios de valoración la seguridad hídrica del país.
- Como resultado de los análisis realizados se propone una guía metodología, enfocada en el cálculo de la oferta hídrica y la demanda potencial del agua de los sectores productivo. En esta se sustentan los pasos a seguir para su cálculo con base a al volumen de información secundaria que se cuente en la zona.
- A nivel mundial son muchas las metodologías que buscan analizar la oferta y la demanda del recurso hídrico. Esto permitió analizar las propuestas y construir una matriz DOFA que busco fundamentalmente establecer cuál de estas metodologías puede ser más aplicable en el país, encontrando que las metodologías que más se ajustan y que se podrían aplicar para un estudio de caso en Colombia, son la metodología de *“Índice relativo local de uso y re-uso de agua”*, *“Índice de sostenibilidad de la cuenca”* y la de *“Índice de Estrés Hídrico”*, alcance que se relaciona durante el desarrollo del documento.
- El índice relativo local de uso y re-uso de agua, maneja el mismo principio de cálculo que presenta la metodología reportada en el Manual *“The Water Footprint Assessment - Setting the Global Standard”* publicado en el año 2011 por la Red de Huella Hídrica (Water Footprint Network). En esta publicación se habla de los términos de *“Índice de escasez de agua azul y verde”*. Igualmente se encontró que este indicador maneja el mismo principio de cálculo para el Estudio Nacional de Agua (ENA) 2014, nombrado en este estudio como *“Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas (IPHE)”* y el Índice de Agua no Retornada a la Cuenca (IARC) respetivamente.

- La metodología “Índice de sostenibilidad de la cuenca”, es aplicable en cuencas que cuenten con un volumen de información que permita alimentar el modelo, entre los más representativos son: datos de calidad de agua, datos institucionales, datos de conservación de la cuenca etc. Esta metodología está más enfocada a medir la gestión que hacen las entidades distritales o privadas para el manejo de las fuentes hídricas, siendo esta una herramienta para evaluar su gestión.
- Como resultado de la comparación de las metodologías investigadas, se encontró que algunas de las metodologías analizadas en la práctica no es posible implementarlas en el país, ya que la disponibilidad de información para alimentar bases de datos, a la fecha en el país son limitadas.
- En la versión actualizada del Estudio Nacional de Agua se implementó el concepto: “Índice de Agua No Retornada a la Cuenca (IARC)”, “Índice de Presión Hídrica a los Ecosistemas (IPHE)” y el “Índices de uso de agua (IUA)”, los cuales son indicadores de seguridad hídrica de las fuentes.
- La cuenca El Curo, de acuerdo con los resultados de oferta y demanda, es calificada con una escasez “baja”.
- Se comparo los resultados obtenidos de la cuenca El Curo, con relación a los calculados para las tres metodologías seleccionada. Producto de esta comparación se encontraron diferencias significativas en los rangos que usa cada una de las metodologías para estimar la escasez. Siendo necesario proponer un cambio la evaluación de los rangos que actualmente sugiere IDEAM en su metodología de índice de escasez.
- La oferta hídrica total se determinó a partir de la oferta neta disponible y el caudal ecológico permanente en las áreas de interés, lo anterior teniendo en cuenta las actualizaciones del cálculo del caudal ambiental.
- Para el cálculo de la demanda se implementó la metodología de módulos de consumo, metodología que actualiza la forma de cálculo que plantea la resolución 865 de 2004. Además, se tuvieron en cuenta las actualizaciones presentadas en el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. Lo anterior para el cálculo del caudal ecológico y el cálculo de la dotación neta.

- Para estimar la oferta se deben disponer de información hidrológica, ambiental, acceso a la información y tecnologías empleadas. Además, las metodologías empleadas para el cálculo de la demanda donde se incluyen las actividades económicas del país, acceso a la información y tecnologías empleadas.
- Resultado de la evaluación realizada las metodologías estudiadas para cada uno de los países, se encontró que en el país no es posible aplicar gran parte de estas, ya que para poder aplicarlas en Colombia se requiere de información específica que a la fecha desconocemos ya que no se han implementado estrategias para garantizar el almacenamiento organizado de la misma. Se encontró que ENA 2010 aplica la metodología (Hoekstra, 2003) de Huella Hídrica, sin embargo, por falta de información la misma no se desarrolla de manera completa.

CAPITULO 6

RECOMENDACIONES

- Aplicar la propuesta presentada en futuros estudios de seguridad hídrica en el País.
- Algunos de los limitantes encontrados en la metodología IDEAM 2004 para el cálculo de la demanda, es la de no actualizar su metodología de cálculo de acuerdo con la actualización de las normas nacionales. Dentro de las mejoras que se espera se apliquen con la nueva publicación del Estudio nacional de Agua es la inclusión del cálculo de la demanda doméstica, con relación a los presentado en la resolución 0330 de 2017, para el cálculo de dotación neta, pérdidas en los sistemas de almacenamiento, tratamiento y distribución de agua.
- Implementar estrategias para que la recolección de información en el país se optimice, de tal forma que se puedan alimentar modelos con datos reales.
- El método empleado en la metodología IDEAM para el cálculo de índice de escasez; Resolución 865 de 2004, sugiere realizar la estimación de un caudal ecológico constante, aplicando un porcentaje de descuento o porcentaje del caudal medio mensual multianual más bajo. Este porcentaje es del 75%. Se sugiere actualizar esta metodología a planteada por ENA 2014 el cual establece “Cuencas con autorregulación alta y poca variabilidad de caudales diarios, en que se considera representativo el valor característico Q85 de la curva de duración (caudal igualado o superado el 85% del tiempo), este valor característico se aplica a estaciones con un índice de regulación hídrica (IRH) igual o superior a 0.70 (alta retención y regulación). Estaciones con valores del IRH inferiores a 0.70, para las cuales se asigna el valor característico Q75 de la curva de duración de caudales medios diarios.
- El método empleado en la metodología IDEAM para el cálculo de índice de escasez; Resolución 865 de 2004, sugiere que una vez se conozca el estado de la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento como de los cuerpos de agua, la oferta hídrica de estos sistemas se debe afectar por el 25%, correspondiendo a la condición de calidad del agua. Se recomienda evaluar la aplicación de la metodología empleada en ENA 2010 para establecer este criterio.

- Para la cuenca El Curo se deben mejorar los aspectos de gestión de cuenca, calidad del agua, protección de áreas e inversión, generan efectos importantes en las condiciones de escasez. Medidas a tomar para aumentar la evaluación de estos parámetros, son importantes para poder garantizar la sostenibilidad de la cuenca.
- Los métodos clasificados como hidrológicos permiten calcular el caudal ecológico a partir del tratamiento de series de registro hidrológico de las cuales se establecen porcentajes de caudal, se determinan índices, se opta por un caudal calificado o establecido previamente como normativo o se calcula a partir de recomendaciones ya establecidas; se recomienda que las series de registro no tengan extensiones inferiores a 20 años y en la medida de lo posible que sean superiores a esta cifra.

CAPITULO 7

REFERENCIAS

- Alcamo, J., Florke, M., & Marker, M. (18 de 06 de 2010). Future long-term changes in global water resources driven by socio economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52, 247–275. Obtenido de <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.52.2.247>
- Allen, R., Perrier, M., & Pereira, L. (1994). *An update for the definition of reference evapotranspiration*. ICID Bulletin.
- Aparicio, F. M. (1999). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico: Limusa.
- Arrache, L. S. (2011). *Intercambio de derechos de uso de agua. Un modelo para la gestión sostenible del recurso hídrico*. Barcelona: Universidad de Catalunya.
- Asheesh, M. (2003). *Allocating the gaps of shared water resources (the scarcity index)*. Oulu: Institute of Technology, Kotkantie. Recuperado el 2018, de https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-69509-7_24
- Assimacopoulos, D. (Marzo de 2004). *Indicators and Indices for decision making in water resources management*. Obtenido de Water Strategy Man Project: <http://environ.chemeng.ntua.gr/WSM/Newsletters/Issue4/Indicators.htm>
- Bradley, A. A., & Zhao, H. (1997). Climatic Variations in Extreme Precipitation in the Midwest. *Submitted to Journal of Hydrologic Engineering*, 4. Obtenido de <http://www.icaen.uiowa.edu/~abradley/publications/rfa2.pdf>
- Brown , A., & Matlock, M. (2011). A review of water scarcity indices and methodologies. *The Sustainability Consortium*, 1-21.
- Budyco, M. (1974). *Climate and Life*. San Diego: Clif.
- Chaves, H. M., & Alipaz , S. (2007). An Integrated Indicator Based on Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy. *The Watershed Sustainability Index. Water Resources Management*, 883-895.
- Chow, V. (1994). *Hidrologia aplicada*. (J. Saldarriaga, Trad.) Bogota: McGraw Hill.
- Consuegra, C. M. (2013). *Sintesis metodologica para la obtencion de caudales ecologicos, resultados y posibles consecuencias*. Bogota: Escuela Colombiana de Ingenieros Julio Garavito.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2016). *Estudio para la determinación de módulos de consumo del recurso hídrico de las 10 cuencas de 2do orden y las ochenta y cuatro cuencas de 3er orden* Corporación Autónoma Regional de

Cundinamarca CAR. Colombia: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR.

- Damkjaer, S., & Taylor, R. (2017). The measurement of water scarcity: Defining a meaningful indicator. *University College London Institute for Sustainable Resources Londres, Reino Unido*, 513-53.
- Dominguez Calle, E., Costa Posada, C., Gonzalo Rivera, H., & Vanegas Sarmiento, R. (2005). El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis ó una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico? *Revista de Ingenieria*, 105. Recuperado el 11 de Mayo de 2018
- Domínguez, E. C., Rivera, H., Vanegas, R. S., & Moreno, P. (2008). Relaciones demanda oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramienta de evaluación del recurso hídrico Colombiano. *Acad. Colomb. Ciencia Volumen 32 No. 123*, 195-211.
- FAO. (2010). *AQUASTAT: Water Use*. Obtenido de http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index6.stm
- Gleick, P. (1995). Water and Conflict: Fresh Water Resources and International Security. *International Security 18 (1)*, 79-112.
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001). A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology Report. *The Eco-Indicator 99*.
- Guavio, C. A. (2015). *Estudio técnico base para la reglamentación de las unidades hidrológicas del área de drenaje el curso del Mmunicipio de Gama*. Gama - Cundinamarca: CorpoGuavio.
- Heaps, C., Kemp-Benedict, E., & Raskin, P. (1998). Conventional Worlds: Technical Description of Bending the Curve Scenarios. *Global Scenario Group, Stockholm Enviromental Institute. Stockholm: PoleStar*.
- Hoekstra, A. (2003). Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Recuperado el 2018, de <http://waterfootprint.org/media/downloads/Report12.pdf>
- Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*. London - Washington DC: Earthscan. Recuperado el Mayo de 2018
- ICWE. (1992). *International Conference on Water and the Environment*. Genova: The Dublin statement and record of the conference.
- IDEAM. (2004). *Metodología para el calculo del índice de escasez de agua superficial*. Bogota D.C: IDEAM.
- Infante Romero, H., & Ortiz, L. (2008). Ajuste metodológico al índice de escasez de agua propuesto por el IDEAM en el plan de ordenación y manejo de la cuenca del río pamplonita, norte de Santander, Colombia. *Revista Colombia Forestal Vol. 11*, 165-173.

- Instituto de Hidrología, M. y. (2008). *Estudio Nacional de Agua*. Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- Instituto de Hidrología, M. y. (2010). *Estudio Nacional de Agua*. Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- Instituto de Hidrología, M. y. (2015). *Estudio Nacional del Agua*. Colombia: Imprenta Nacional.
- Jaramillo Rojas, C., Molina, F., & Betancur, T. (2011). índices de escasez y de calidad del agua para la priorización de cuerpos de agua en los planes de ordenación del recurso hídrico. aplicación en la jurisdicción de Corantioquia. *Ingenierías Universidad de Medellín* Vo. 10, 33-46.
- Kalbermatten, J., Julius, D., Gunnerson, C., & Mara, D. (1982). *Appropriate sanitation alternatives: a planning and desing manual*. Banco Mundial.
- Lvovotc, M. L. (1970). World water balance (General Report). *Symposium on the world water balance. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. No 93 Vol II*, 401-415.
- Martinez, L. F., & Ruiz, L. F. (1998). *Metodologia para la estimacion de datos faltantes en series temporales diarias*. IDEAM.
- McNulty, Moore, J., & Cohen, C. (2010). Robbing Peter to Pay Paul: Tradeoffs Between Ecosystem Carbon Sequestration and Water Yield. *Proceeding of the Environmental Water Resources Institute Meeting*, 12.
- Meigh, J. R., McKenzie, A. A., & Sene, K. J. (1999). A Grid-Based Approach to Water Scarcity Estimates for Eastern and Southern Africa. *Water Resources Management*, 85-115.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2012). *Alternativas para evitar una sequia prolongada en la ganaderia Colombiana*. Colombia: Sanmartín Obregón & Cía Ltda.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2004). *Resolucion 865*. Colombia: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolucion 0330*. Republica de Colombia: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Molle, F., Molliga, P., & Philippus, W. (2009). *www.water-alternatives.org*. Obtenido de Hydraulic Bureaucracies and the Hydraulic Mission: Flows of Water, Flows of Power: <http://www.water-alternatives.org/index.php/allabs/65-a2-3-3/file>
- Ohlsson, L. (2000). Water Conflicts and Social Resource Scarcity. *Phys. Chem. Earth* 25, no. 3, 213-220.
- Organizacion de los estados americanos. (2004). *Metodologia para el calculo de indice de escasez de acua superficial*. Lina: Talleres de la oficina tecnica de administracion del INEI.

- Parques Nacionales naturales de Colombia. (06 de 08 de 2018). *Parques Nacionales naturales de Colombia*. Obtenido de Parques Nacionales naturales de Colombia: <http://www.parquesnacionales.gov.co/tesauroambiental/C/CAUDAL>
- Pfister, Stephan, Annette, A., & Hellweg, S. (2009). Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA.". *Environmental Science & Technology (American Chemical Society)*, 4098-4104.
- Policy Research Institute. (2007). *Canada water sustainability index project report*. Canada: Government of Canada.
- Rijsberman, F. R. (2004). *Water Scarcity: Fact or Fiction?. "New directions for a diverse planet"*. Brisbane: Proceeding of the 4th International Crop Science Congress. .
- Schmidt, G., & Benitez, C. S. (Agosto de 2013). How to distinguish water scarcity and drought in EU water policy. *GLOBAL WATER FORUM*. Recuperado el Mayo de 2018, de <http://www.globalwaterforum.org/2013/08/26/how-to-distinguish-water-scarcity-and-drought-in-eu-water-policy/>
- Silva, A., Ponce de León, J., García, F., & Durán, A. (1988). *Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay*. Universidad de la República Uruguay.
- Smakhtin, V., Revenga, C., & Doll, P. (2004). Taking into account Environmental Water Requirements in Global - scale Water Resources Assessments. *Colombo: International Water Manegment Institute .*
- Smith, R., & Velez, M. (1997). *Hidrologia de Antioquia*. Secretaria de obras publicas departamentales.
- Sokolo, A. A., & Chapman, T. G. (s.f.). *Metodos de calculo del balance hidrico*. Madrid, España: Instituto de Hidriología de España.
- Solley, W., Pierce, R., & Perlman, H. (1998). *Estimated Use of Water in 1995. U.S. Geological Survey Circular 1200*. Alexandria, Virginia. Obtenido de <http://water.usgs.gov/watuse/pdf1995/pdf/summary.pdf>. Accessed in July 2007
- Sullivan , C. (2002). Calculating a Water Poverty Index. *World Development (Elsevier Science Ltd) 30. No 7*, 1195-1210.
- Szollosi-Nagy, A., Najlis , P., & Bjorklund, G. (1998). *Evaluacion de los recursos mundiales de agua dulce*. naturaleza y Recursos.
- Torres Rojas, L. P. (30 de Julio de 2015). *Universidad Andes*. Obtenido de Visor tesis: https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor_de_tesis/web/?SessionID=L1Rlc2lzXzlwMTUyMDEvNzE3NC5wZGY%3D&as_sfid=AAAAAAUziZFmGeVT9LNSplufybks9yah_6kDOdGRpMa3apNE-v4VuFS7sYO6IXQBqRsYXlIheRICZoHYbyuajC5sxtGtbh5IHw1oEJV59kml2ScYSyQ%3D%3D&as_fid=j8pXWlcjX7NFBAv7GSP

- Torres, A., & Peñaranda, G. (2006). *Regionalización de caudales mínimos por métodos estadísticos de la cuenca Magdalena Cauca*. Bogotá: Universidad de la Salle.
- UN-Consejo Económico y Social. (1997). *Evaluación general de los recursos de agua dulce del mundo*. New York: Informe del Secretario General.
- UNESCO. (1982). *Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur*. Montevideo: Rostlac.
- Vicente Serrano, S. M. (1 de 1 de 2012). <http://aeclim.org>. Obtenido de <http://aeclim.org>: http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0066_PU-SA-VIII-2012-SM_VICENTE.pdf
- Vorosmarty, C. J., Douglas, E. M., Green, P. A., & Revenga, C. (2005). Geospatial Indicators of Emerging Water Stress: An Application to Africa. *AMBIO* 34 (3), 230-236.
- White, C., Allendes, D., & Wyrwoll, P. (2014). Global Water Issues and Insights. En C. White, *Global Water Issues and Insights* (págs. 161-165). Australia: Anu Press.
- Yang, H., & Zehnder, J. B. (2002). Water Scarcity and Food Import: A Case Study for Southern Mediterranean. *World Development* 30, no. 8, 1413-1430.
- Yang, H., Reichert, P., Abbaspour, K. C., & Zehnder, J. B. (2003). A water resources threshold and its implications for food security. *Environmental Science & Technology (American)*, 3048-3054.
- Zhang, L., Dawes, W., & Walter, G. (1999). *Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance*.
- Zhou, G., Sun, G., Wang, X., Zhou, C., McNulty, S., Vose, J., & Amatya, D. (2008). *Estimating forest ecosystem evapotranspiration at multiple temporal scales with a dimension analysis approach*. JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION. Recuperado el 2018, de https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/ja_zhou006.pdf
- Zuluaga Duque, L. (2011). *Simulador piloto de la oferta y la demanda hídrica en una microcuenca rural para la validación de metodologías y la evaluación de políticas de manejo sostenible del recurso agua*. Medellín: Universidad Nacional.