INDICE SOCIOAMBIENTAL DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN FUENTES SUBTERRÁNEAS RURALES COTA, CUNDINAMARCA (COLOMBIA)

Andrea Carolina Fiquitiva Sierra

Ingeniera Sanitaria

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

MAESTRÍA DESARROLLO SUSTENTABLE Y GESTIÓN AMBIENTAL

Bogotá D.C

2024

ÍNDICE SOCIOAMBIENTAL DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN FUENTES SUBTERRÁNEAS RURALES COTA, CUNDINAMARCA (COLOMBIA)

Presentado por:

Andrea Carolina Fiquitiva Sierra

Ingeniera Sanitaria

Propuesta de investigación para optar al título de Magíster en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental

Director:

Miguel Ángel Gamboa Castellanos

Ing. Forestal, Msc. Gestión Ambiental

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

MAESTRÍA DESARROLLO SUSTENTABLE Y GESTIÓN AMBIENTAL

Bogotá D.C

2024

Tabla de Contenido

Resumen 12
Abstract 13
1. Planteamiento del problema 14
1.1. Pregunta de investigación 16
2. Justificación 17
3. Objetivos 19
3.1. Objetivo General 19
3.2. Objetivos Específicos 19
4. Marco Teórico 20
4.1. Indicador 20
4.1.2. Escalas de medición de indicadores socioambientales 21
4.1.3. Indicadores socioambientales 22
4.2. Índice 24
4.3. Índices socioambientales 24
4.4. Tipos de indicadores socioambientales 25
4.5. Calidad del agua y su relación con la sociedad. 26
4.6. Importancia del agua como derecho humano. 27
4.7. Fuentes hídricas subterráneas y su factor socioambiental 29
4.8. Características Fisicoquímicas y Microbiológicas del Agua 30
4.9. Indicadores e índices de la calidad del agua 30
4.10. Antecedentes de los indicadores de calidad del agua 32
4.11. Clasificación y uso de los índices en recursos hídricos 33
4.12. Determinantes de elección de los índices 33
4.13. Estado del arte 35
Experiencias Internacionales 35
Experiencias Nacionales 36
4.15. Legislación Asociada 37
4.16. Alcance de la Investigación 40
4.17. Hipótesis 40
5. Materiales y Métodos 41
5.1. Método de investigación 41
5.2. Diseño de la investigación 41

5.3. Descripción Metodológica 45
5.3.1. Analizar el estado de conocimiento de los índices socioambientales de calidad del agua subterránea en el contexto nacional e internacional. 45
5.3.1.1. Sistema de búsqueda bibliográfica 45
5.3.1.2. Sistema de análisis bibliográfico 45
5.3.1.3 Etapas de análisis 45
5.3.1.4 Análisis Estadístico 46
5.3.2. Proponer un índice socioambiental de la calidad del agua de consumo humano para las fuentes hídricas subterráneas de las áreas rurales del municipio de Cota (ISCAFS) a partir de índices propuestos e indicadores socioambientales de mayor impacto 47
5.3.2.1. Diagnóstico preliminar del área de estudio 48
5.3.2.2. Selección de indicadores socioambientales 50
5.3.2.3. Aplicación de metodologías de selección para indicadores socioambientales 50
5.3.2.3.1. Metodología Videla & Schroh 50
5.3.2.3.2. Metodología Proceso del Análisis Jerárquico (AHP, siglas en inglés) 52
5.3.2.4. Propuesta del índice socioambiental (ISCAFS) 54
5.3.2.4.1. Selección de indicadores socioambientales y parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la calidad del agua para consumo humano 55
5.3.2.4. 2. Propuesta de la ecuación del índice socioambiental ISCAFS 56
5.3.3. Validar el índice socioambiental propuesto a través de diferentes análisis y determinar si estos son suficientes para evidenciar su posible comportamiento en las fuentes subterráneas del área rural del municipio de Cota. 59
5.3.3.1. Aplicación de prueba piloto en las fuentes subterráneas 60
5.3.3.2. Análisis comparativo-índices de calidad del agua para consumo humano 62
5.3.3.3. Prueba de Análisis de sensibilidad y Análisis de Varianza (ANOVA) 62
6. Resultados y Discusión 64
6.1. Analizar el estado de conocimiento de los índices socioambientales de calidad del agua subterránea en el contexto nacional e internacional. 64
6.2. Proponer un índice socioambiental de la calidad del agua de consumo humano para las fuentes hídricas subterráneas de las áreas rurales del municipio de Cota (ISCAFS) a partir de índices propuestos e indicadores socioambientales de mayor impacto. 70
6.2.1. Diagnóstico preliminar del área de estudio 70
6.2.2. Selección de indicadores socioambientales 77
6.2.3. Propuesta del índice socioambiental de la calidad del agua en fuentes subterráneas de las áreas rurales (ISCAFS) 92

6.3. Validar el índice socioambiental propuesto a través de diferentes análisis y evidenciar su suficiencia y posible comportamiento en las fuentes subterráneas del área rural del municipio de Cota. 99

6.3.1. Aplicación prueba piloto del índice socioambiental en las fuentes subterráneas del área rural. 99

6.3.2. Comparación de índices de la calidad del agua para consumo humano 109

6.3.3. Análisis de Sensibilidad 113

6.3.4. ANOVA y Análisis de Sensibilidad mediante Python 116

7. Conclusiones 122

8. Recomendaciones 125

Anexos 126

Referencias 134

Lista de Tablas

Tabla 1. Normatividad asociada al Recurso Hídrico para consumo humano 37
Tabla 2. Puntuaciones asignadas a la metodología Videla y Schroh 51
Tabla 3. Escala de evaluación proceso de análisis jerárquico (AHP) 52
Tabla 4. Ponderación para determinar el Índice aleatorio 54
Tabla 5. Resultados obtenidos de la revisión literaria a nivel mundial de indicadores 64
Tabla 6. Medición inicial por expertos de indicadores, metodología Videla y Schroh 2000. 77
Tabla 7. Resultados evaluación y selección de indicadores genéricos método AHP 80
Tabla 8. Resultados de evaluación de indicadores específicos método proceso análisis jerárquico (AHP) 81
Tabla 9. Resultados de rangos de medición de los indicadores con mayor impacto en el territorio. 83
Tabla 10. Indicadores socioambientales seleccionados a utilizar en el índice (ISCAFS) 91
Tabla 11. Escala de clasificación índice socioambiental de la calidad del agua de fuentes subterráneas para áreas rurales del municipio de Cota (ISCAFS) 97
Tabla 12. Resultados de mediciones obtenidas fuente hídrica subterránea el Abra 100
Tabla 13. Resultados de mediciones obtenidas fuente hídrica subterránea el Salvio 101
Tabla 14. Resultados de mediciones obtenidas fuente hídrica subterránea la Moya 103
Tabla 15. Resultados de mediciones obtenidas fuente hídrica subterránea Cetime 104
Tabla 16. Resultados obtenidos para la aplicación del índice socioambiental (ISCAFS) 107
Tabla 17. Resultados comparativos de índices de la calidad del agua fuentes subterráneas. 110
Tabla 18.Datos obtenidos en el análisis de sensibilidad de la ecuación (ISCAFS) 113
Tabla 19. Análisis ANOVA Python 116

Lista de Figuras

Figura 1. Diseño de la Metodología 44
Figura 2. Esquema del proceso de selección de los 50 artículos utilizados en el estudio 66
Figura 3. Co-ocurrencias de palabras en torno a los índices de calidad 68
Figura 4. Tendencias investigativas en agua subterránea en el periodo 2013-2022 68
Figura 5. Resultados género encuestados 71
Figura 6. Resultados rangos de edad encuestada 71
Figura 7. Resultados sector residencial 72
Figura 8. Resultados Nivel Educativo 72
Figura 9. Resultados condiciones mejora de la calidad del agua 73
Figura 10. Resultados uso fuentes subterráneas 74
Figura 11. Resultados problemas de salud asociados a la calidad del agua 75
Figura 12. Propuesta índice socioambiental de la calidad del agua para consumo humano ISCAFS 98
Figura 13. Resultados obtenidos de índices de calidad del agua para consumo humano 111
Figura 14. Resultados variaciones del análisis de sensibilidad en el ISCAFS 114
Figura 15. Análisis de Sensibilidad F1 ISCAFS Python 117
Figura 16. Análisis de sensibilidad F2 ISCAFS Python 117
Figura 17. Análisis de sensibilidad F3 ISCAFS Python 118

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo muestra representativa a encuestar 50
Ecuación 2. Cálculo de consistencia 53
Ecuación 3. Cálculo de índice de consistencia 53
Ecuación 4. Cálculo de índice aleatorio 54
Ecuación 5. Índice Canadiense para medición de calidad del agua ($CCME_WQI$) 58
Ecuación 6. Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano (IRCA) 62
Ecuación 7. Índice socioambiental de calidad del agua para fuentes hídricas subterráneas (ISCAFS) 93

Nota de Aceptación

_____
_____
_____
_____
_____

MSc. Miguel Ángel Gamboa Castellanos
Director de Tesis

_____

Jurado 1

_____

Jurado 2

Bogotá D.C, 2024

Dedicatoria

A mis padres Esther y Carlos quienes han sido más que un apoyo, el mejor regalo que Dios me brindó en la tierra, gracias por su amor.

A mi hermano Sebastián, quien ha sido mi mayor inspiración y la motivación para dar lo mejor de mí siempre, gracias por escucharme y apoyarme.

A mi mejor amigo Fabio, gracias por ser mi apoyo incondicional, por estar ahí sin importar el qué, porque siempre me motivaste en este proceso.

A mis amigas Paula y Angie quienes fueron una bendición en este camino, por todas las experiencias, trasnochadas y momentos compartidos, gracias por su complicidad y amistad.

Agradecimientos

Dios siempre presente en mi vida, agradecida con la oportunidad que me brindó de cumplir un sueño de niña que se transformó en realidad.

Agradezco a mi director y profesor Msc. Miguel Ángel Gamboa Castellanos por su apoyo, por siempre brindarme sus conocimientos, por ser un guía fundamental y, por sobre todas las cosas, su invaluable desempeño como docente, mil y mil gracias.

A los profesores, directivos y administrativos del programa de Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por todo el conocimiento brindado y su servicio. Una mención especial al profesor Julio Eduardo Beltrán quien ya no se encuentra con nosotros, gracias por dejar huella en mi formación como profesional.

A los compañeros y personas en el camino que tuvieron una palabra de motivación y que con sus lindos deseos me apoyaron en la realización de este trabajo.

Resumen

Las fuentes de agua han sido históricamente una de las bases del desarrollo de la población humana. Los asentamientos humanos han sido desde la antigüedad localizados cercanos al cauce de los ríos para el desarrollo de diversas actividades, como ganadería, agricultura, y comunicación. El objetivo general de este trabajo fue desarrollar un índice socioambiental para evaluar las condiciones de la calidad del agua en las fuentes subterráneas de abastecimiento en áreas rurales del municipio de Cota, Cundinamarca, Colombia. La pregunta de investigación se enfoca en ¿Cuáles son los indicadores y criterios de análisis sociales y ambientales que pueden mejorar la evaluación de la calidad del agua mediante el desarrollo de un índice socioambiental en el área rural del municipio de Cota? Se identificaron parámetros fisicoquímicos como el hierro y la turbiedad los cuales fuera de los rangos normativos debido posiblemente a déficits en los sistemas de tratamiento, la falta de alcantarillado y la disposición inadecuada de aguas residuales las cuales contribuyen a la contaminación del agua. El proceso de construcción del índice se dividió en tres etapas. La primera consistió en el reconocimiento y recopilación de información en la literatura acerca de los indicadores más utilizados en la evaluación de la calidad del agua, seguido de una validación mediante encuestas semiestructuradas que se aplican en el área rural de Cota, específicamente relacionada con fuentes hídricas subterráneas. La segunda etapa consistió en la selección de indicadores socioambientales mediante una metodología ya establecida, combinada con el método Delphi y la aplicabilidad del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP). Posteriormente, se incorporó información proveniente de entidades públicas de Cota para mejorar la aplicabilidad del índice. En la tercera etapa, se relacionan cuantitativamente los datos obtenidos de los indicadores seleccionados, asignándoles pesos relativos. Se propone una ecuación para el índice, y se seleccionan los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua. Se establecieron escalas que permitieron evaluar el impacto humano en las fuentes hídricas subterráneas del municipio en las áreas rurales, evidenciando que los indicadores de calidad de vida tienen un alto impacto para el municipio.

Palabras claves: calidad del agua, indicadores ambientales, normas de calidad del agua (DesC).

Abstract

Water sources have historically been one of the bases for the development of the human population. Since ancient times, human settlements have been located near riverbeds for the development of various activities, such as livestock, agriculture, and communication. The general objective of this work was to develop a socio-environmental index to evaluate the conditions of water quality in underground supply sources in rural areas of the municipality of Cota, Cundinamarca, Colombia. The research question focuses on: What are the social and environmental analysis indicators and criteria that can improve the evaluation of water quality through the development of a socio-environmental index in the rural area of the municipality of Cota? Physicochemical parameters such as iron and turbidity were identified, which were outside the regulatory ranges, possibly due to deficiencies in the treatment systems, the lack of sewage and the inadequate disposal of wastewater, which contribute to water pollution. The index construction process was divided into three stages. The first consisted of the recognition and compilation of information in the literature about the most used indicators in the evaluation of water quality, followed by validation through semi-structured surveys that are applied in the rural area of Cota, specifically related to water sources. underground. The second stage consisted of the selection of socio-environmental indicators using an already established methodology, combined with the Delphi method and the applicability of the Hierarchical Analysis Process (AHP). Subsequently, information from public entities in Cota was incorporated to improve the applicability of the index. In the third stage, the data obtained from the selected indicators are quantitatively related, assigning them relative weights. An equation for the index is proposed, and the physicochemical parameters of water quality are selected. Scales were established that allowed evaluating the human impact on the municipality's underground water sources in rural areas, showing that quality of life indicators have a high impact for the municipality.

Keywords: water quality, environmental indicators, water quality standards (DeC)

1. Planteamiento del problema

El agua subterránea es un recurso hídrico esencial para el abastecimiento de agua potable, la agricultura y la industria, de una comunidad o población. Sin embargo, su calidad se ve amenazada por diversas presiones, tanto naturales como antropogénicas, así como la intrusión salina, la contaminación por nitratos y pesticidas, y por la sobreexplotación de acuíferos (Asare et al., 2021; Jean-Eudes et al., 2022). Según estudios de la Secretaria Nacional del Agua, en Ecuador, el 77.55% del agua subterránea se usa para consumo humano; sin embargo, importantes fuentes de agua subterránea, especialmente en la región amazónica, se encuentran contaminadas por actividades antrópicas como minería, extracción de petróleo, aguas residuales y agricultura (Herrera et al., 2019).

En la mayoría de los países en desarrollo, el riesgo microbiológico para la población rural debido al consumo de agua subterránea no potable, es bastante marcado principalmente asociado a un inadecuado saneamiento, lo que se ratifica en la Agenda 21 de la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, que afirma que aproximadamente el 80% de todas las enfermedades y más de una tercera parte de las defunciones en estos países tienen por causa el consumo de agua contaminada y hasta una décima parte del tiempo productivo de las personas se dedica a enfermedades relacionadas con el consumo de agua no potable (Borrero, 2018).

De otra parte, en los últimos años, se ha avanzado significativamente en el desarrollo de índices de calidad del agua para evaluar la calidad del agua subterránea (Aguirre & Meza, 2021; Singh et al., 2022; Mondal et al., 2023). Sin embargo, para lo que trata esta investigación, no están enfocados a profundidad en la calidad del agua para consumo humano. Asimismo, la mayoría de los índices de calidad del agua se centran en parámetros fisicoquímicos sin considerar indicadores en aspectos sociales y ambientales que también afectan la calidad del agua y su accesibilidad para las comunidades (Pandey et al., 2021; Sarkar & Kumar, 2022).

Si bien, en Colombia se ha ido trabajando en la incorporación de índices socioambientales, sin embargo, en utilidad y para fines determinación de la calidad del agua proveniente de agua subterránea para consumo humano aún son escasos, lo que permite ahondar en que la evaluación

integral para la calidad del agua de consumo humano en áreas rurales mediante un índice socioambiental requiere una metodología robusta pero que permitirá ser tomado en cuenta como una herramienta de utilidad para la gestión de los recursos hídricos para suministro de consumo humano (Li et al., 2023).

En Colombia, por ejemplo, se ha encontrado que la calidad del agua para consumo humano en zonas rurales es un problema significativo, con la presencia de compuestos de nitrógeno amoniacal (NH_4), nitrito (NO_2) o nitrato (NO_3) en aguas subterráneas debido a la contaminación, por lo tanto, no todos los habitantes cuentan acceso a agua potable dado el aislamiento geográfico al cual están expuestas algunas comunidades (Argumedo et, al. 2022). En el estudio de la organización Financiera del Desarrollo (Findeter) realizado durante 2017, se determinó que, en las zonas urbanas, 97 de cada 100 personas tienen acceso a agua potable; en cambio en las zonas rurales la proporción cambia a 74 de cada 100 personas.

Ahora, con relación a las fuentes de abastecimiento del recurso hídrico en el municipio de Cota que son netamente subterráneas, se ha identificado que parámetros fisicoquímicos como el hierro y turbiedad están fuera de los rangos normativos derivados del déficit en los sistemas de tratamiento. Uno de los principales riesgos de contaminación del agua, se debe principalmente a la naturaleza del subsuelo, formado por rocas cristalinas o suelos blandos lo que, vinculado a la falta de alcantarillado, además de conexiones erradas y a la disposición de la mayor parte de sus aguas servidas en el subsuelo a través de tanques sépticos. Por otra parte, la sobreexplotación del recurso hídrico puede causar el descenso del nivel del agua subterránea, lo que genera sequías, hundimientos del terreno y la intrusión de agua salinizada. Además, puede afectar la disponibilidad de agua para consumo humano, agricultura y otros usos (Giugni et al., 2020). En el municipio de Cota, no se han generado aportes frente a indicadores de calidad del agua más allá del IRCA (índice de riesgo de la calidad del agua) ni estudios que permitan relacionar condiciones sociales y ambientales que determinen la generación de nuevas estrategias frente al mejoramiento de las condiciones de las fuentes de abastecimiento.

En el anterior contexto, surgió la necesidad de desarrollar un índice socioambiental integral para evaluar la calidad del agua subterránea para consumo humano en la zona rural del municipio

de Cota, el cual debería considerar no solo los parámetros fisicoquímicos del agua, sino también los factores sociales y ambientales que pueden afectar su calidad y accesibilidad (Aguirre & Meza, 2021).

1.1.Pregunta de investigación

Por lo tanto, el objeto de esta investigación radicó en el planteamiento de la siguiente pregunta problema ¿Cuáles son los indicadores y criterios de análisis sociales y ambientales que pueden mejorar la evaluación de la calidad del agua, mediante el desarrollo de un índice socioambiental en el área rural del municipio de Cota (Cundinamarca, Colombia)?

2. Justificación

Para realizar un diagnóstico de la calidad del agua en fuentes subterráneas, es absolutamente necesario incluir parámetros de análisis ambientales y sociales que ayuden a comprender mejor el contexto social y ambiental que prevalece dentro de un grupo o asentamiento humano a diagnosticar. Para realizar el diagnóstico, es necesario comprender el tipo de relación del ser humano con la naturaleza y entender el contexto del estilo de vida, requiriendo técnicas de análisis macrosocial. Este diagnóstico se realiza con el fin de identificar la problemática actual del medio ambiente y posibles soluciones a través del análisis de la percepción social y las amenazas ambientales (Mafaldo & Santistevan, 2017).

Con la creación de la Comunidad Económica Europea, en el año 2007, se propone un nuevo índice de calidad de agua universal, el cual llamaron UWQI, para evaluar la calidad de aguas superficiales y su potabilidad, donde se emplean los siguientes doce parámetros fisicoquímicos: Cadmio, Cianuro, Mercurio, Selenio, Arsénico, Fluoruro, Nitratos, Oxígeno disuelto, demanda Bioquímica de Oxígeno, Fósforo Total, pH y Coliformes Totales, (Torres, 2009). En México y Latinoamérica muchos de estos índices de calidad de agua, han sido adaptados a las condiciones de sus sistemas hídricos para ser utilizados como medida de evaluación y control del recurso hídrico, (Aragüés et al., 2011).

Investigaciones efectuadas sobre la calidad de los cuerpos hídricos, se basaron en el análisis de indicadores de calidad, medidos directamente en los cuerpos de agua. Sin embargo, no consideraron la influencia de las variables poblacionales en asentamientos humanos y su entorno, tales como la conservación de suelos forestales y bosques fluviales, la estabilización de las riberas y el uso de la tierra en actividades agrícolas, entre otros; ni el efecto que estos tienen sobre la calidad del agua. (FAO, 2013). Conforme con lo anterior, ésta propuesta de investigación identifica la necesidad de ampliar estudios de la calidad del agua desde una visión holística; es decir, que involucre aspectos sociales y ambientales, lo cual permitirá obtener mayor rango de variables que ayuden a desarrollar el índice de calidad de agua, de manera integral frente a la evaluación del recurso hídrico, debido a que estas variables intentan llenar la brecha existente entre la necesidad de identificar los problemas relevantes relacionados al medio socio ambiental y las posibles alternativas que posibilitan su desenvolvimiento de forma sustentable y más equitativa

frente a la mejora de la calidad del agua (Araujo, et al., 2012). El generar un diagnóstico desde enfoques sociales y ambientales para el municipio de Cota, será beneficioso al contar con una evaluación no sólo desde el ámbito fisicoquímico sino que desde la selección pertinente de indicadores sociales y ambientales será mucho más completo, es por ello, que el índice socioambiental se establece como una posible herramienta de evaluación frente a las condiciones de la calidad para consumo humano en las áreas rurales y lograr evitar posibles afectaciones a la salud pública.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Desarrollar un índice socioambiental para determinar las condiciones de la calidad del agua de consumo humano para las fuentes subterráneas de abastecimiento en áreas rurales del municipio de Cota, Cundinamarca (Colombia) en el periodo comprendido entre el año 2020 y 2023.

3.2. Objetivos Específicos

Analizar el estado de conocimiento de los índices socioambientales de calidad del agua subterránea en el contexto nacional e internacional.

Proponer un índice socioambiental de la calidad del agua de consumo humano para las fuentes hídricas subterráneas de las áreas rurales del municipio de Cota (ISCAFS) a partir de índices propuestos e indicadores socioambientales de mayor impacto.

Validar el índice socioambiental propuesto a través de diferentes análisis y evidenciar su suficiencia y posible comportamiento en las fuentes subterráneas del área rural del municipio de Cota.

4. Marco Teórico

4.1. Indicador

Un indicador es una variable que describe una característica del estado de un sistema a través de observaciones o estimaciones de datos. Los indicadores se utilizan para vigilar las tendencias de sostenibilidad desde un punto de vista retrospectivo (Dizdaroglu, 2015). Proporcionan información a los responsables de la toma de decisiones sobre cómo algunos factores afectan a las estructuras ambientales, permitiéndoles encontrar soluciones e imaginar escenarios a largo plazo (Bălteanu & Dogaru, 2011).

Un indicador "…es más que una estadística, es una variable que en función del valor que asume en determinado momento, despliega significados que no son aparentes inmediatamente, y que los usuarios decodificarán más allá de lo que muestran directamente, porque existe un constructor cultural y de significado social que se asocia al mismo" (Quiroga, 2001). Es una variable que brinda las bases para evaluar tendencias ambientales, sociales y económicas, o establecer metas de políticas. Los indicadores pueden ser cualitativos (aparición de canalículos de erosión, percepciones sobre la utilidad de una tecnología, etc.), cuantitativos (tasa de infiltración, rendimientos, valor de la producción, cantidad de nemátodos, etc.) o índices compuestos por la relación entre diferentes variables (índice de calidad del suelo, índice de desarrollo humano) (Astier et al., 2002). Los indicadores son herramientas clave para evaluar y monitorear el progreso hacia los objetivos de desarrollo sostenible, proporcionando datos esenciales que guían la formulación de políticas y la toma de decisiones." (United Nations, 2020)

Los indicadores son elementos que sirven para la medición de procesos. Un Indicador Ambiental se define como un valor con respecto a un parámetro que proporciona información cuantitativa acerca de un fenómeno, permitiendo explicar cómo cambian las cosas a lo largo del tiempo y/o el espacio, haciendo comparables situaciones distintas, y ayudando, de esta forma, a la prevención y corrección de determinadas situaciones ambientales. (Morán, 2023).

Además, un indicador de sustentabilidad lleva implícito un conjunto de valores y metas evocados en el concepto de sustentabilidad (Quiroga, 2001). Por ello, los indicadores son muy importantes para hacer operativos los atributos de sustentabilidad en variables que se puedan medir localmente. En otras palabras, los indicadores de sustentabilidad son herramientas útiles para reducir la complejidad de la descripción de un sistema (Giampietro, 1997). Ayudan a promover la comunicación entre los diferentes agentes relacionados con el sistema de manejo, y a construir consenso. Asimismo, los indicadores son particulares a los procesos de los que forman parte, y aquellos que son apropiados para ciertos sistemas pueden ser inapropiados para otros. Por esta razón, no existe una lista de indicadores universales. De hecho, los indicadores concretos dependerán de las características del problema específico bajo estudio, de la escala del proyecto, del grado de acceso y de la disponibilidad de datos. El conjunto de indicadores seleccionados está relacionado con su criterio de formulación y debe responder a los objetivos de la evaluación (Bakkes *et al.,* 1994).

Evans (2010), expresa que *"la necesidad de medir la sustentabilidad ha motivado el desarrollo y uso de indicadores, aplicando la noción de los valores numéricos para la sustentabilidad, para la dirección, la cuantificación y la evaluación, buscando valores únicos y la simplificación de sistemas complejos y comparaciones fáciles. En esta tentativa, se tratan tres aspectos básicos":*

- Necesidad de una definición clara y precisa.
- Enfoque holístico de sustentabilidad.
- Importancia de escalas temporales y espaciales

4.1.2. Escalas de medición de indicadores socioambientales

Los sistemas socioambientales se localizan en escalas espaciales, institucionales y temporales específicas, que a su vez se articulan e interactúan a diferentes niveles. Por ejemplo, el manejo de un sistema agrícola en la parte alta de una cuenca impacta las zonas más bajas de ésta. Enfocarse sólo en una escala determinada puede ocultar procesos importantes que sólo se hacen evidentes en escalas más finas o amplias. 'Escalar' (hacia arriba o hacia abajo) significa ligar procesos y actores procedentes de otros niveles espaciales, temporales y sociales (Lovell et al.,

2002). Por lo tanto, ‘escalar’ va más allá de la simple agregación o desagregación de los resultados de un nivel determinado para obtener resultados en otro nivel deseado. Los autores Lovell et al. (2002) describen las escalas temporales, espaciales y administrativas o institucionales. La primera se refiere al tiempo que tardan los procesos socioambientales en cambiar de uno a otro estado. Para cada escala se pueden identificar indicadores tanto en el área ambiental como en la económica y la social. En cualquiera de los casos, se procura tener una representación estadística aceptable. El tipo de monitoreo necesario para obtener información válida por indicador depende del sistema de manejo de los recursos naturales (SMRN) y del problema bajo estudio (Astier & González, 2007).

4.1.3. Indicadores socioambientales

Los indicadores han cambiado drásticamente a lo largo de la historia. Los primeros seres humanos dependían netamente de la naturaleza y el medio para su bienestar, por ello se guiaban con indicadores como el clima, la fructificación de las plantas y la migración de los animales. Los avances tecnológicos -como el uso de herramientas- dieron a los humanos un mayor control de su entorno, ampliando enormemente el alcance de la capacidad sensorial, así como los tipos de conocimientos que se valoraban (Angermeier & Karr, 2018).

Se ha demostrado que, para alcanzar el desarrollo sustentable a una escala mundial, es imprescindible la práctica de los indicadores ambientales, sociales y de gobierno, principalmente para crear un marco de desarrollo entre los agentes económicos (Caro y Puch, 2021). Los indicadores socioambientales se consideran un marco normativo de evaluación más amplio que los modelos tradicionales, enfocados principalmente en aspectos financieros. Al tomar en cuenta ello, se incluyen además de los resultados financieros de las empresas, su impacto social, ambiental y de gobierno (Li et al., 2021).

De acuerdo con revisiones bibliográficas, se referencia la metodología de Videla & Schroh, 2000, con el fin de identificar algunos indicadores socioambientales que se han propuesto para el desarrollo de estudios relacionados con este trabajo de investigación.

Los indicadores son herramientas que permiten conocer y analizar información específica sobre determinados aspectos y espacios con base en un valor de referencia (Sánchez, 2008). Para ello se identifican o construyen variables con valor explicativo. Su formulación, aplicabilidad y

evaluación son muy importantes ya que representan los compromisos de empresas, instituciones, asociaciones de los sectores públicos y privados y de la comunidad local en conjunto (Sánchez, 2008).

La clasificación de los indicadores socioambientales se basa en diferentes criterios (Ibáñez, 2012). A continuación, se mencionan los más importantes:

1. Según la dimensión del desarrollo sostenible al que están orientados: estos indicadores se fundamentan en los alcances temáticos del desarrollo sostenible, social, económico, ambiental, y actualmente se incluye el institucional.

2. Según el sentido teórico y la obtención de datos para su elaboración:
2.a Indicadores objetivos (duros): son cuantitativos y en ellos se emplea información objetiva obtenida a través de los diferentes métodos de captación y procesamiento.
2. b. Indicadores subjetivos (alternos): son cualitativos y en ellos se emplea información obtenida a partir de opiniones y percepciones de la población respecto a una situación que les involucra.

3. Según el modelo en el que estén basados:
3.a Basados en el modelo presión-estado-respuesta (PER): modelo que supone que las actividades humanas ejercen presión sobre el ambiente provocando cambios en su estado. A ello, las comunidades responden adoptando medidas que tratan de mantener el equilibrio ecológico más adecuado. Sus relaciones causa-efecto confluyen por medio de indicadores basados en los aspectos de la sostenibilidad, los cuales son:

- Indicadores de presión: "Describen la presión ejercida por las actividades humanas sobre el ambiente y los recursos naturales; están relacionados con los patrones de producción y de consumo".

- Indicadores de estado: "Diseñados para mostrar imágenes (estado) de la situación que guardan el medio ambiente y los recursos naturales en el tiempo".

- Indicadores de respuesta: "Vinculados con acciones y reacciones colectivas que lleva a cabo la sociedad para mitigar, adaptar y revertir los efectos negativos de las actividades humanas sobre el medio ambiente" (Ibáñez, 2012).

4.2. Índice

A través de cada indicador, se podrán obtener los datos pertinentes, que deberán ser llevados a escalas adecuadas para ordenarlos. De acuerdo con los datos obtenidos, se evaluará en cada escala el comportamiento que sigue cada indicador. No obstante, esto no permite todavía medir claramente la variable, pues entrega información fragmentaria, que debe ser integrada o sintetizada para llegar a un valor único, que exprese lo que en realidad ocurre con la variable. Para lograrlo, se debe sumar ponderadamente los valores de los indicadores, obteniendo un valor total que se denomina índice, y que es el que nos dará la información relevante sobre el problema en estudio (Sabino, 1996). Por otra parte, es importante resaltar que para la implementación de un índice socioambiental de la calidad del agua no solo ayuda a identificar áreas de riesgo, sino que también permitirá la formulación de políticas públicas. Por ejemplo, estrategias basadas en la generación de un índice puede priorizar intervenciones en comunidades con mayores vulnerabilidades socioeconómicas, garantizando así un uso equitativo y sostenible de los recursos hídricos (Martínez et al., 2022).

4.3. Índices socioambientales

El índice socioambiental de la calidad del agua integra múltiples parámetros físicos, químicos y biológicos, junto con factores socioeconómicos y demográficos. Este enfoque multidimensional permite una evaluación comprensiva del estado del agua y los riesgos asociados. Según Singh et al. (2021), los parámetros clave incluyen la presencia de contaminantes químicos (nitratos, metales pesados), indicadores biológicos (coliformes fecales), y factores socioeconómicos (nivel de educación, acceso a infraestructura de saneamiento).

Según Sen (2008), las estrategias de desarrollo de los países tienen que contemplar acciones en el sentido de crear un clima económico, social, político y cultural favorable a sus individuos. Ello porque el desempeño de cada persona depende de las oportunidades económicas, de las libertades políticas, cuestiones sociales y educacionales, y del estímulo de sus iniciativas. De esta manera, la calidad de vida del individuo está íntimamente relacionada con las oportunidades efectivas dadas por las realizaciones colectivas, tanto pasadas como presentes. Sachs (2007) complementa a Sen, y dice que el desarrollo sustentable debe enfatizar, además de

la problemática económica y social, en cuestiones ambientales. Esto significa, por ejemplo, que la elevación de calidad de vida y la equidad social deben ser objetivos centrales (propósito final) del modelo de desarrollo. De la misma manera, la eficiencia y el crecimiento económico son esenciales, pues se hace improbable aumentar la calidad de vida con equidad sin que la economía tenga condiciones de crecer económicamente. La preservación ambiental o prudencia ecológica es otro hecho extremadamente importante. En la ausencia de condiciones ambientales adecuadas, no es posible asegurar la calidad de vida y la equidad social a las generaciones futuras. Gallopín (1982) completa enfatizando que las condiciones ambientales se relacionan íntimamente a la calidad de vida, pues ésta es vista como resultante de la salud de la persona y de su sentimiento de satisfacción.

La evaluación de la calidad del agua mediante un índice socioambiental requiere una metodología robusta que combine análisis de laboratorio con encuestas socioeconómicas. Métodos recientes incluyen el uso de tecnologías avanzadas de teledetección y GIS para mapear y monitorear la calidad del agua en tiempo real (Li et al., 2023). Estos métodos permiten una recopilación de datos más precisa y una mejor visualización de los resultados.

El índice socioambiental en el contexto de la calidad del agua en fuentes subterráneas ha generado como resultado de la evaluación de la vulnerabilidad pueden obtenerse mapas que muestran zonas con mayor o menor sensibilidad a la contaminación, los que generalmente se construyen para el acuífero superior o freático. Estos niveles de sensibilidad permiten valorar la vulnerabilidad en forma relativa entre las regiones que integran un área (Bessouat et al., 2001).

4.4. Tipos de indicadores socioambientales

Existen indicadores que se identifican más comúnmente con una dimensión específica, ya sea económica, social o ambiental. También hay indicadores que se asocian a sistemas de manejo específicos, como los sistemas forestales, pecuarios, acuícolas, reservas naturales, entre otros. Sin embargo, estas áreas temáticas o disciplinarias en la realidad no funcionan de manera aislada, sino que se traslapan; así, un indicador que pertenece a un ámbito específico puede afectar también otras áreas temáticas (Astier y Hollands, 2007).

Según Abbona et al., 2007), existen indicadores de estado y de manejo. Los primeros aportan información del estado actual de un recurso natural o social como rendimientos, balances de nutrientes o costos de producción. Y, los indicadores de manejo parten del supuesto de que ciertas prácticas tienen un efecto determinado (positivo o negativo) en el estado de un recurso natural o un componente del sistema determinado. Algunos ejemplos son: frecuencia de rotación de las parcelas; tipo de prácticas utilizadas para el control de plagas o la conservación de suelos, y grado de cumplimiento de normas para el uso de los recursos naturales (Astier y Hollands, 2007).

De otra parte, existen indicadores cuantitativos y cualitativos. Las variables cuantitativas son aquellas que permiten medir propiedades tangibles, susceptibles de ser calculadas e interpretadas numéricamente. Se expresan en escalas que indican tanto el orden de los objetos como la distancia entre ellos. Ejemplos de indicadores cuantitativos son: rendimientos (kg / ha), el grado de compactación del suelo o los ingresos monetarios. Las variables cualitativas se utilizan comúnmente para medir propiedades o cualidades que tienen o pueden tener una naturaleza subjetiva, por ejemplo, las percepciones estéticas. Se expresan en escalas ordinales que indican el orden de los objetos a medir de acuerdo con su menor o mayor contenido de dicha propiedad (Astier & González, 2007).

4.5. Calidad del agua y su relación con la sociedad.

El recurso hídrico es indispensable para el desarrollo humano, (Oladipo et al., 2020) y garantizar su disponibilidad, gestión y saneamiento es uno de los Objetivos para el Desarrollo Sostenible de la agenda 2030. Por esto, se deben monitorear las fuentes de agua para consumo humano, debido a que son susceptibles a la contaminación por descarga de aguas residuales municipales y drenaje urbano sobre las cuencas hidrográficas (Liyanage & Yamada, 2017).

Teniendo en cuenta que, la calidad del agua es de vital importancia para el desarrollo de la vida, como consecuencia de las actividades antrópicas el agua se ha ido alterando en sus propiedades físicas, químicas y biológicas debido a varios agentes de la naturaleza y por la forma en que se utiliza (Olmos , 2013). Por ende, se transforma en un reto de mejorar una situación tan compleja, la cual requiere de un trabajo conjunto de las instancias de gobierno y de la población,

además de involucrar cuestiones técnicas, implica buscar un cambio de conducta y promover la utilización de nuevas prácticas de manejo del agua. Para esto es necesario comprender el comportamiento de los actores involucrados y promover la apropiación del recurso hídrico por medio de programas o acciones en educación ambiental (Mostert, 2003; Soares, 2006). El diagnostico socio ambiental se transforma en una herramienta descriptiva y cuantitativa para estudio de casos ambientales, estos se manifiestan en falta de planificación de ausencia de cultura y educación ambiental, generando de manera directa el uso inadecuado de los recursos (Olivares, 2014); mediante el diagnóstico ambiental se detectan los impactos ambientales negativos y se trazan líneas de acción (Castellanos, 2012).

Para realizar un diagnóstico es absolutamente necesario incluir parámetros de análisis ecológicos y sociales que ayuden a comprender mejor el contexto social y ambiental que prevalece dentro de un grupo o asentamiento humano a diagnosticar, para realizar en diagnóstico es necesario comprender el tipo de relación del hombre con la naturaleza y entender el contexto en el estilo de vida, requiriendo técnicas de análisis macrosocial que es el carácter subjetivo, este diagnóstico se realiza con el fin de identificar la problemática actual del medio ambiente y posibles soluciones a través del análisis de la percepción social y las amenazas ambientales (Ortega, et al., 2012).

4.6. Importancia del agua como derecho humano.

La calidad del agua es un determinante crucial de la salud pública, especialmente en áreas rurales donde las fuentes de agua subterráneas son la principal fuente de agua potable. La contaminación de estas fuentes puede tener graves consecuencias para la salud y el bienestar de las comunidades. Estudios recientes han subrayado la necesidad de un monitoreo constante y preciso de la calidad del agua para prevenir enfermedades y garantizar el acceso a agua segura (Nguyen et al., 2022).

El agua se considera como un derecho fundamental y, se define, de acuerdo con lo establecido por el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, como *"el derecho de todos de disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal o doméstico*" (Pardo, 2020). El agua se erige como una necesidad básica, al ser un

elemento indisoluble para la existencia del ser humano. El agua en el ordenamiento jurídico colombiano tiene una doble connotación pues se erige como un derecho fundamental y como un servicio público. En tal sentido, todas las personas deben poder acceder al servicio de acueducto en condiciones de cantidad y calidad suficiente y al Estado le corresponde organizar, dirigir, reglamentar y garantizar su prestación de conformidad con los principios de eficiencia, universalidad y solidaridad. (Corte Constitucional de Colombia, Sentencia T-740/11).

La Declaración de Estocolmo, señala que: *"El hombre tiene el derecho fundamental a la libertad, la igualdad y el disfrute de condiciones de vida adecuadas, en un medio ambiente de calidad tal que le permita llevar una vida digna y gozar de bienestar, y tiene la solemne obligación de proteger y mejorar el medio ambiente para las generaciones presentes y futuras"* (Hernández, 2011). En 1994, en reunión celebrada en Ginebra, se elaboró la primera Declaración de Principios de Naciones Unidas sobre Derechos Humanos y Medio Ambiente (Pentinat, 2014), que establece la dimensión medioambiental de los derechos humanos como parte de las garantías fundamentales: derecho a la vida, a la integridad, y a la salud, entre otros. Esta Declaración constituye el primer instrumento internacional que especifica los vínculos existentes entre los derechos humanos y el medio ambiente, al argumentar que es una necesidad aceptar la inclusión del derecho a un medio ambiente sano en el conjunto de los derechos humanos.

Posteriormente, la Declaración de Bizkaia, de febrero de 1999, sobre el Derecho Humano al Medio Ambiente (Pentinat, 2014), tiene el objetivo principal de incluir en la Declaración Universal de los Derechos Humanos un artículo específico que establezca el derecho de las generaciones futuras a heredar un medio ambiente sano y ecológicamente equilibrado. El derecho al medio ambiente internacionalmente no se encuentra activamente protegido, lo que deviene de las normas de derecho internacional carecen de naturaleza coactiva necesarias para su efectividad, por su carácter de recomendaciones o principios aceptados por los gobiernos y no siempre recogidas pese a los compromisos adoptados, en su legislación interna.

4.7. Fuentes hídricas subterráneas y su factor socioambiental

El acceso al agua se considera un derecho humano fundamental y desempeña un papel esencial en el desarrollo sostenible de la sociedad, tal como se reconoce en los objetivos de desarrollo sostenible. La mayor parte del agua dulce no congelada disponible, alrededor del 98%, se encuentra en aguas subterráneas y puede utilizarse para diversos fines según sus características físicas, químicas y biológicas (Subba Rao y Chaudhary, 2019). Este recurso es más abundante en términos cuantitativos que el agua superficial y desempeña una serie de funciones cruciales en los ecosistemas.

La calidad del agua es relevante con respecto a la planificación y gestión de los recursos hídricos, debido a que depende de la disponibilidad de este y el poder atender las demandas sin comprometer a la salud humana. Sin embargo, la calidad de agua está relacionada directamente con las actividades antropogénicas de la microcuenca (Reyes y Morales 2021), es decir los contaminantes aumentan por mayor interacción con la actividad humana, es por ello por lo que las variables se incrementan de manera gradual a medida que se registran de la cabecera del rio a la desembocadura (Rivera 2016).

A pesar de que el agua subterránea tiende a ser menos vulnerable a la contaminación de origen humano y a las variaciones ambientales debido a sus características hidrogeológicas, se han suscitado preocupaciones a nivel mundial relacionadas con la creciente demanda de este recurso y el aumento de la contaminación (Kumar et al., 2015). Es importante destacar que una vez que un acuífero se contamina, resulta prácticamente imposible su limpieza y los procesos de remediación conllevan costos económicos y sociales significativos (Kalhor et al., 2019).

La contaminación del agua no solo afecta su calidad, sino que también amenaza la salud humana, el desarrollo económico y la prosperidad social (Milovanovic, 2007). Por ello, la calidad de las aguas subterráneas ha recibido una atención particular, ya que se requiere agua de alta calidad para las necesidades domésticas y de riego (Sadat-Noori et al., 2014). En tal sentido, para conocer la calidad de las aguas subterráneas, se han aplicado diversos enfoques: i) análisis fisicoquímicos y biológicos (Sadat-Noori et al., 2014; Yaseen Al-Araji, 2019), ii) sistemas de

información geográfica (Sadat-Noori et al., 2014; Singha et al., 2015), iii) índices de calidad de agua (ICA) (Sánchez et al., 2016; Khatri et al., 2020), entre otros.

En el ámbito de la investigación sobre el agua subterránea, se ha centrado en evaluar su calidad mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos y socioambientales, así como en examinar las variaciones hidrológicas en términos espaciales y temporales que afectan la gestión integral de este recurso hídrico.

4.8. Características Fisicoquímicas y Microbiológicas del Agua

Las características físicas del agua son aquellas que se detectan sensorialmente, por efectos de evaluación, el olor y el sabor se ponderan por medio de los sentidos; por otro lado, las características químicas son aquellas debidas a elementos o compuestos químicos, que según investigaciones científicas pueden causar efectos nocivos a la salud humana (Ledesma, 2018). Para el municipio de Cota, de acuerdo con informes de Secretaría de Salud de Cota para los años comprendidos entre el 2020 al 2023 los que presentan rangos fuera de la normativa son, el hierro, la turbiedad y el color, principalmente.

Las características microbiológicas son debidas a microorganismos que resultan nocivos a la salud humana, se determinan en contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y organismos coliformes fecales (Mafaldo & Santistevan, 2017). De acuerdo con reportes tomados de la Secretaría de Salud de Cota para el año 2021, estas características se encuentran dentro de los rangos permitidos por la Resolución 2115 de 2007 expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Y Ministerio de ´Protección Social.

4.9. Indicadores e índices de la calidad del agua

La determinación de la calidad de un cuerpo de agua usualmente conlleva el análisis de una cantidad grande de indicadores. Estos se expresan en diferentes magnitudes y unidades, que difieren entre sí y con diferente comportamiento, en términos de su relación concentración-impacto (Abassi, 2002). Los indicadores son datos estadísticos o mediciones de una cierta condición,

cambio de la calidad o del estado de lo que se evalúa. Si varios indicadores se integran de forma que generan un solo valor, se les denomina índices (FAO, 2001). Por tanto, un índice es usado para sintetizar una gran cantidad de información de muchas variables o indicadores, que se transforman en una sola variable y que es fácil de entender e interpretar.

La planificación del recurso hídrico es un proceso complejo que resulta de la interacción de muchas disciplinas y la misma población involucrada, se deben tomar las medidas para que el recurso no falte o escasee por algún motivo, proteger las fuentes hídricas, promover la educación ambiental y la sostenibilidad de las aguas superficiales ya que de ella dependen muchos ecosistemas. A pesar de los intentos por estandarizar los indicadores, en la realidad existe una diversidad de criterios e indicadores en temas ambientales, desde los criterios e indicadores de Bandera Azul Ecológica, los indicadores de los ODS, hasta los utilizados por el Programa Estado de la Nación, sin mencionar los que utilizan las instituciones y empresas para medir su desempeño ambiental (Romero et. al, 2020).

En particular, los índices de calidad fisicoquímicos se basan en la combinación de diferentes parámetros fisicoquímicos para proporcionar una visión global de la calidad del agua. La ventaja de este tipo de índices de calidad se basa en que el análisis de los parámetros involucrados suele ser más rápido y puede ser monitoreado con mayor frecuencia, en comparación con los métodos biológicos, basados en la observación y medición de ciertas comunidades de seres vivos en las aguas. Además, la elección de las especies debe ser cuidadosa, ya que de esta depende la evaluación de la calidad del recurso, que generalmente sólo se realiza para un uso determinado, a diferencia de las fisicoquímicas, que permiten una evaluación para diferentes tipos de uso.

Ahora, en el proceso de desarrollo de un nuevo índice generalmente comprende cinco (5) etapas, tal como se ha señalado en diversas fuentes (Fernández y Solano, 2007; de Armas et al., 1992; Patiño et al., 2013; González, 2006; SNET, 2013; García, 2012); son las siguientes:

a) Selección de Variables o Indicadores de Calidad: En esta fase, se eligen cuidadosamente las variables o indicadores que se desean evaluar y que formarán parte integral del nuevo índice.

b) Desarrollo de la Expresión Matemática: Se procede a la creación de una expresión matemática que permita calcular el índice de manera precisa.

c) Determinación de Factores de Ponderación (Wi): En caso de que la expresión matemática lo requiera, se asignan factores de ponderación (Wi) a cada indicador, considerando su relevancia.

d) Transformación de Unidades de Medición: Se lleva a cabo la transformación de las unidades absolutas de medición de cada indicador en un subíndice (SI) de valores relativos adimensionales en una escala que va de 0 a 100, siguiendo prácticas comunes en la literatura (Cude, 2001; Nasiriam, 2007; León, 1992).

e) Cálculo del Índice Compuesto de Calidad (ICA): Finalmente, se calcula el ICA mediante la fórmula matemática previamente establecida, basándose en la información obtenida en las etapas anteriores.

Es importante destacar que los pasos a y c pueden ser obtenidos mediante diversas metodologías, como entrevistas a expertos, la aplicación de grupos Delphi o el uso de herramientas estadísticas, como el Análisis Estadístico de Correlación Bivariada, según se ha mencionado en la literatura (Abassi, 2002; León, 1992; Fernández y Solano, 2007).

4.10. Antecedentes de los indicadores de calidad del agua

Actualmente se considera el agua como un recurso esencial que requiere la máxima atención de los Estados por ser indispensable para la preservación de la vida y encontrarse expuesta al deterioro, en ocasiones irreversible, ocasionado por un uso irresponsable e intensivo del recurso. Valdés, Samboni y Carvajal, (2011), comentan que, en la valoración y evaluación de la calidad del agua, se han empleado diversas metodologías entre las que se incluyen: comparación de las variables con la normatividad vigente; los indicadores propuestos, a partir de un grupo de variables medidas, se genera un valor que califica y cualifica la fuente, y metodologías más elaboradas como la modelación. De otra parte, la calidad del agua se mide de acuerdo con distintos parámetros mediante los cuales se cuantifica el grado de alteración de las cualidades naturales y se la clasifica para un uso determinado. Según Guillén, Teck, Kohlmann y Yeomans 2012, el Índice de Calidad del Agua (ICA) indica el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo y está expresado

como porcentaje del agua pura; así, agua altamente contaminada tendrá un cercano o igual a 0%, en tanto que el agua en excelentes condiciones tendrá un valor de este índice cercano al 100%.

4.11. Clasificación y uso de los índices en recursos hídricos

Los índices pueden clasificarse en diez categorías, (Samboni, 2007), orientados de acuerdo con su uso, dentro de cuatro grupos, así:

Grupo I, se aplica a los tensores e incluye dos categorías: Indicadores en la fuente: reportan la calidad de agua generada por tensores en fuentes discretas. Indicadores en un punto diferente a la fuente: reportan la calidad del agua generada por fuentes difusas.

Grupo II, miden la capacidad de estrés: 41 Indicadores de medidas simples: incluyen muchos atributos y componentes individuales del agua, que pueden ser usados como indicadores de su calidad. Indicadores basados en criterios o estándares: correlacionan las medidas de calidad del agua con los niveles estándar o normales que han sido determinados para la preservación y usos adecuados del agua.

Grupo III, indicadores para lagos: específicamente desarrollados para este tipo de sistemas.

Grupo IV, tiene en cuenta las consecuencias: Indicadores de la vida acuática: basados en diferentes reacciones de tolerancia de la biota acuática a varios contaminantes y condiciones. Indicadores del uso del agua: evalúan el agua respecto a usos como abastecimiento y agricultura. Indicadores basados en la percepción: se determinan por la opinión pública y los usos de los cuerpos de agua.

4.12. Determinantes de elección de los índices

Teniendo en cuenta la metodología propuesta por Saaty 1990, la cual denomina el método jerárquico, el cual consiste en realizar comparaciones que se pueden hacer contra una escala absoluta o entre sí. Esta comparación es realizada por los expertos o utilizando los datos estadísticos disponibles. Aquí es donde entra en juego el aspecto cualitativo del proceso, y

recomendó una escala del 1 al 9, con 1 significado de igual importancia de un criterio para otro criterio, mientras que 9 significa extremadamente importante.

Teniendo en cuenta la comparación por pares, entre criterios y partiendo de la escala de valores, se construye una matriz de prioridad o también llamada matriz de comparación de pares. Obtenidos los resultados de los criterios se procede a evaluar los subcriterios utilizando nuevamente los juicios de valor, realizando la normalización de la matriz y el cálculo de consistencia, dando como resultado una ponderación para cada subcriterio (Loaiza, 2015).

Siguiendo los requisitos técnicos establecidos para los indicadores, es esencial considerar los siguientes aspectos, como lo señalan Castro y Bonaño en 2002:

- Existencia y Determinación: La función matemática que define un indicador debe tener una existencia clara y una solución perfectamente definida.
- Exhaustividad: El indicador debe aprovechar al máximo la información proporcionada por las variables que lo componen, garantizando que ninguna información relevante se quede sin considerar.
- Monotonía: El indicador debe responder de manera positiva ante cambios positivos en sus componentes y de manera negativa ante cambios negativos, manteniendo una relación coherente con las variaciones en los datos subyacentes.
- Invariancia: El indicador debe mantener su validez y coherencia incluso frente a cambios en el origen o la escala de sus componentes, de manera que sea robusto en diferentes contextos.
- Homogeneidad: La función matemática que define el indicador debe cumplir con el requisito de homogeneidad de grado 1, lo que significa que multiplicar todos los componentes por un factor constante también debe multiplicar el valor del indicador por ese mismo factor. Esto se expresa como $f(\propto \cdot x1,\cdots,\alpha \cdot xp)=\alpha \cdot f(x1,\cdots,xp)$.

A manera de conclusión algunos de los aspectos mencionados en el anterior marco teórico, se tuvieron en cuenta en la presente investigación.

4.13. Estado del arte

Experiencias Internacionales

La mayoría de los estudios realizados enfocados en la determinación de índices de calidad del agua, sin tener en cuenta las variables o condiciones socioambientales. Para los años 80 y 90, comienza a generalizarse el uso de los índices bióticos, y se proponen otros nuevos (CEPAL, 2004). En Estados Unidos, se desarrollan métodos rápidos de evaluación, macroinvertebrados acuáticos, como bioindicadores. En España se adoptan los macroinvertebrados acuáticos en los programas de evaluación de la calidad del agua, se crea un índice de calidad que valora el estado de conservación del bosque de ribera, se determina la calidad de las aguas en relación con las características de las especies de macroinvertebrados y la riqueza de dichas especies.

Por otra parte, se identifica la investigación ejecutada en red de abastecimiento de la parroquia Ricaurte del cantón Chone en el Ecuador, para los años 2016 – 2017 con el objetivo de determinar la incidencia del servicio de agua potable en la calidad social – ambiental, en donde se analizó la situación actual de la calidad fisicoquímica, social y microbiológica del recurso a través de análisis de laboratorios. Además, se realizaron encuestas para conocer y evaluar el estado actual del funcionamiento de la red de distribución. Otro estudio realizado por Tischer (2013), sobre Indicadores socioambientales, cuyo objetivo de este trabajo de tesis fue analizar un modelo de indicadores socioambientales con el propósito de establecer un Informe de Calidad Ambiental de la Zona Costera de este país, donde se inició con la selección de indicadores franceses aplicados para el área de estudio.

Continuando en Ecuador, se realizó una investigación para la determinación de la presión antrópica mediante indicadores socioambientales en la cuenca quebrada de la Mesa, Piñas, la cual, propone la utilización de la metodología de Videla & Schroh (2000), con la finalidad de evaluar una lista de indicadores socioambientales obtenidos mediante observaciones de campo, los cuales fueron capaces de medir la presión antrópica ejercida en el área de estudio.

En Costa Rica, se realizó la creación de un modelo estadístico para predecir la calidad del agua superficial utilizando únicamente variables del entorno socio ambiental en microcuencas. Durante el desarrollo del modelo estadístico matemático, se analizaron varios indicadores e índices de la calidad del agua superficial. Además, se investigó la relación que existe entre estos índices

con variables de poblaciones humanas y su entorno. Finalmente, una vez desarrollado el modelo de predicción, se llevó a cabo su validación para determinar su grado de confiabilidad.

En el caso de Brasil para el año 2013, se generó un caso de estudio en Santa Catarina, que comprende los promontorios costeros de Penha, Itajaí y Balneário Camboriú; zonas más afectadas por el proceso de urbanización y por presiones sobre sus recursos naturales, provocando destrucción o degradación. Se constató que las principales fuentes de presión son el crecimiento poblacional y el turismo, que acaban generando una serie de efectos al medio ambiente natural y se planteó una serie de indicadores socioambientales aplicados en la gestión de ambientes costeros.

En Guatemala para el año 2013, se desarrolló una investigación por Angela María Méndez, que consistió en la elaboración y ejemplificación de un sistema para la evaluación de proyectos mediante indicadores socioambientales en la cuenca del Lago de Amatitlán, Guatemala. El estudio, abarcó el análisis de 140 potenciales indicadores, la selección final fueron 72 indicadores relevantes a los cuales se les asignó pesos por categorías específicas utilizando el sistema matemático conocido como Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) por sus siglas en inglés: Analytic Hierarchy Process.

Experiencias Nacionales

En Colombia son numerosos los esfuerzos emprendidos para desarrollar sistemas de información e indicadores ambientales y de gestión (Celemin et. al, 2015). La primera experiencia emprendida por una entidad pública de la escala nacional para la identificación de indicadores de la calidad del agua fue liderada en 1996 por la Unidad de Política Ambiental (UPA). La metodología utilizada consistió en, la definición de problemas ambientales relevantes para el país, la identificación de los temas y las variables estratégicos acerca de dichos problemas, y posteriormente la selección del conjunto de indicadores bajo el marco ordenador Presión-Estado-Respuesta – PER, al cual le fueron incorporadas las categorías de Efecto/Impacto y Gestión.

Realizando una búsqueda frente a posibles experiencias a nivel nacional, se identifica que es muy limitado el análisis y ejecución ante la realización de índices socioambientales para predecir condiciones de calidad del agua, ya que si bien, en la mayoría de los estudios generados en el país han sido asociados a la elaboración de índices de calidad del agua (ICA). Un ejemplo,

es el de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, el cual, actualmente utiliza el Índice de la calidad del agua (WQI) Water Quality Index (por sus siglas en inglés) como instrumento que permite identificar el deterioro o mejora de la calidad de los ríos urbanos de la Capital, este indicador agrupa los parámetros contaminantes más representativos, establecidos como objetivos de calidad, dentro de un marco unificado.

Adicionalmente, en la ciudad de Bogotá, para el año 2004 se realizó un proyecto a cargo de Edith Guttman, a cerca de un diseño de un sistema de indicadores socioambientales en donde se hace utilización de la metodología PER para generar un relacionamiento entre las variables sociales y ambientales. El proyecto se alimenta de un marco ordenador propio Presión-Estado-Impacto/Efecto-Respuesta, y la información que producen se ordena bajo dicho concepto.

De otra parte, en el Corredor de Conservación Chocó-Manabí (Colombia-Ecuador) Echeverri, 2009, realizó un estudio de deforestación y fragmentación para obtener los datos necesarios que permitieran definir indicadores de estado para el sistema de monitoreo socioambiental del corredor.

4.15. Legislación Asociada

La principal normativa que rige el tema de calidad del agua para consumo humano y uso doméstico en Colombia es el Decreto 1575 del año 2007, emitido por el Ministerio de la Protección Social y la Resolución 2115 del año 2007, emitida el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por medio del cual se establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano.

Tabla 1. Normatividad asociada al Recurso Hídrico para consumo humano

Normatividad del Recurso Hídrico	
DECRETO 1575 DE 2007 Ministerio de la Protección Social	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.

Resolución 2115 de 2007 Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Y Ministerio de Protección social.	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano
Resolución 1615 de 2015 del Ministerio de Salud y Protección Social	Por la cual se autorizan los laboratorios para la realización de análisis fisicoquímico y microbiológico para el agua de consumo humano
Resolución 0631 del 17 de marzo de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	"Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones"
Resolución 4716 del 2010 del Ministerio de la Protección Social	Elaboración de mapas de riesgo de la calidad del agua para consumo humano
Constitución Política (4°, 27 y 115) y la Ley de Aguas Nacionales	Reconoce que toda persona tiene derecho al acceso, la disposición y el saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible
La Ley de Aguas Nacionales (LAN)	Ordenamiento reglamentario del artículo 27 constitucional; regula la distribución y control del agua, y designa a la Comisión Nacional del Agua como el órgano responsable de ejercer la autoridad y administración del agua a nombre del Ejecutivo.

VII Foro Internacional del Agua 2015	Daegu y Gyeongju, Corea del Sur. El lema para las discusiones y seminarios fue: "Agua para nuestro futuro"
Acuerdo Regional sobre el Acceso a la Información, la Participación Pública y el Acceso a la Justicia en Asuntos Ambientales en América Latina y el Caribe	El fundamento de este Acuerdo se encuentra en el Principio 10 de la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de 1992, que establece lo siguiente: "el mejor modo de tratar las cuestiones ambientales es con la participación de todos los ciudadanos interesados, en el nivel que corresponda.

Fuente: Elaboración propia

4.16. Alcance de la Investigación

En el contexto de este estudio, una investigación correlacional es fundamental porque permite comprender cómo diferentes factores sociales, como las prácticas de la comunidad y las acciones de las entidades administrativas, se relacionan con la calidad del agua en las fuentes subterráneas. Identificar estas relaciones es esencial para desarrollar un índice que refleje de manera precisa la situación socioambiental del agua en el municipio. Al exponer la necesidad de acudir a una investigación correlacional, se destaca la importancia de comprender la complejidad de los factores que influyen en la calidad del agua y cómo estos interactúan entre sí. Además, una investigación de este tipo proporciona información valiosa para la planificación y gestión ambiental, al identificar los criterios que deben considerarse para mejorar la calidad del agua y promover prácticas sostenibles en la comunidad y las entidades administrativas locales.

4.17. Hipótesis

A continuación, se presenta la hipótesis de la realización de esta de investigación y la hipótesis nula, así:

H1: El desarrollo de un índice socioambiental de la calidad del agua en el municipio de Cota, departamento de Cundinamarca, permitirá ser un instrumento que aporte a las condiciones de la evaluación de la calidad del agua para consumo humano con relación a otros índices.

H0: El desarrollo de un índice socioambiental de la calidad del agua en el municipio de Cota, departamento de Cundinamarca, no permitirá ser un instrumento que aporte a las condiciones de la evaluación de la calidad del agua para consumo humano con relación a otros índices.

5. Materiales y Métodos

5.1. Método de investigación

El desarrollo o construcción del índice socioambiental de la calidad del agua para consumo humano de fuentes hídricas subterráneas en la zona rural del municipio de Cota, departamento de Cundinamarca (Colombia), se ejecutó bajo una investigación de tipo correlacional, debido a que se involucrarán temas desde los enfoques ambientales, económicos y sociales, que permitirán la selección óptima referente a los indicadores de evaluación socioambientales, a determinar para la construcción y propuesta del índice; permitiendo explorar posibles relaciones entre variables y cómo se influyen mutuamente.. Este enfoque es pertinente porque permite examinar las relaciones entre diferentes variables ambientales, económicas y sociales, cruciales para seleccionar los indicadores de evaluación socioambientales (Hernández, Fernández & Baptista, 2014). La información será de tipo documental recopilada de diferentes fuentes de información, de igual manera se ejecutarán instrumentos de recolección de información primaria metodológica, con el fin de establecer los criterios para la construcción del índice.

5.2. Diseño de la investigación

El desarrollo de esta investigación se ejecutó bajo un marco de análisis estructural y secuencial de tres (3) fases, que a su vez desglosan procesos metodológicos para el cumplimiento del objetivo general de esta investigación la cual se describe a continuación:

Fase 1: Revisión de Literatura y Selección de Indicadores

1. **Revisión de Literatura:**
    - Se realizó una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre indicadores socioambientales a nivel mundial. Se analizaron enfoques, tipos y variables con mayor citación e implementación.
    - Esta revisión permitió determinar los posibles indicadores a utilizar en el desarrollo del índice socioambiental.

2. **Selección y Clasificación de Indicadores:**
    - Los indicadores socioambientales relevantes para la calidad del agua subterránea en Cota se seleccionaron y clasificaron según las metodologías de Videla & Schroh (2000).
    - Se aplicó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para reducir la subjetividad en la selección e implementación de indicadores (Saaty, 2008).
    - La metodología de Calvopiña (2021) sirvió como referencia para el análisis y aplicación del AHP en este contexto.

Fase 2: Recolección de Información Primaria

1. **Encuestas Semiestructuradas:**
    - Se implementaron encuestas semiestructuradas dirigidas a la comunidad rural de Cota. Estas encuestas recolectaron datos de percepción sobre la calidad del agua subterránea.
    - Las encuestas proporcionaron información primaria esencial para la construcción del índice socioambiental, asegurando la inclusión de la perspectiva comunitaria.

Fase 3: Proposición y Validación del Índice

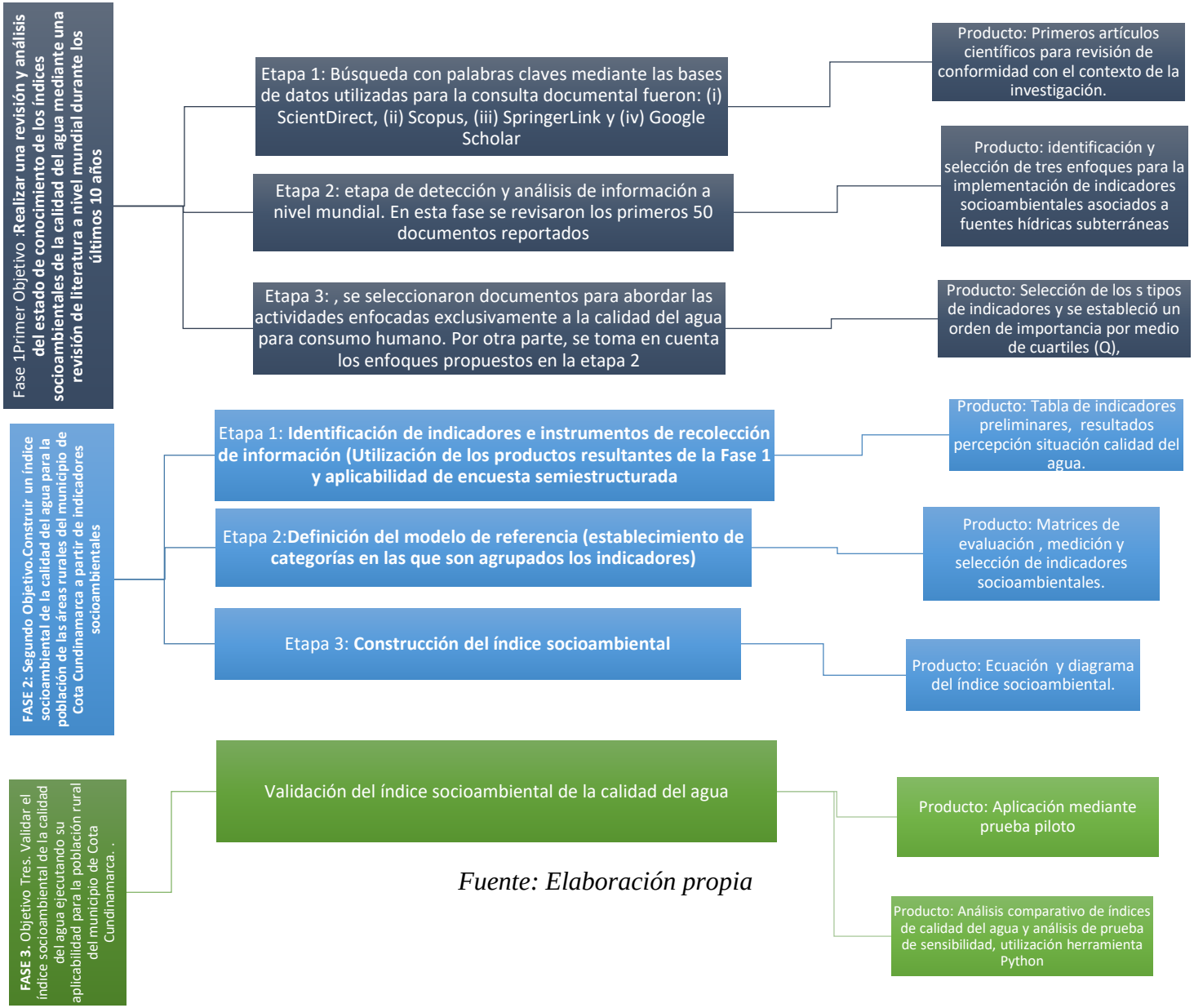
1. **Definición del Índice Socioambiental:**
    - A partir de la información recopilada y los indicadores seleccionados, se definió la propuesta índice socioambiental de la calidad del agua para consumo humano.
2. **Validación del Índice:**
    - La propuesta el índice se validó en el área rural del municipio de Cota mediante la aplicabilidad en todas las fuentes subterráneas existentes en el municipio en su área rural.
    - La validación fue propuesta mediante los análisis propuestos en la literatura y aquellos que posiblemente pudieran obtener una información preliminar para la determinación del comportamiento del índice propuesto ejecutados bajo un análisis de sensibilidad y comparación con otros índices propuestos.

Por otra parte, esta investigación se basó en una selección y clasificación de indicadores socioambientales para el estudio de la calidad del agua subterránea en el municipio de Cota; los cuales fueron evaluados cuantitativa y cualitativamente de acuerdo con las metodologías planteadas por Videla & Schroh (2000). Para reducir la subjetividad en su determinación y de la implementación en conjunto de la técnica del Proceso Analítico Jerárquico (AHP, siglas en inglés), se analizaron metodologías aplicadas en el caso de estudio elaborado por (Calvopiña, 2021).

De igual manera, se utilizó como instrumento para la recolección de información primaria, encuestas semiestructuras, aplicadas a la comunidad asociada con el fin de obtener datos de percepción asociados a la calidad del agua proveniente de las fuentes subterráneas en la comunidad rural.

Finalmente, se definió el índice socioambiental, se da verificación de este, mediante su validación en el área rural del municipio, y que permitiera generar estrategias a futuro, por los entes administrativos en conjunto con la comunidad del territorio en estudio. Lo anterior, se observa en la Figura 1, como el diseño metodológico de la presente investigación.

Figura 1. Diseño de la Metodología



Fuente: Elaboración propia

5.3. Descripción Metodológica

5.3.1. Analizar el estado de conocimiento de los índices socioambientales de calidad del agua subterránea en el contexto nacional e internacional.

5.3.1.1. Sistema de búsqueda bibliográfica

Para el desarrollo de esta revisión bibliográfica se utilizó una metodología de búsqueda sistemática acerca de los indicadores socioambientales aplicados a la evaluación de la calidad del agua. En esta revisión, se consideraron los documentos publicados a escala mundial durante los últimos 10 años (2013 al 2023). Las bases de datos utilizadas fueron Google Académico, ScienceDirect, SpringerLink y Scopus. Para la revisión bibliográfica se tuvo en cuenta todos los campos de búsqueda de las bases de datos consultadas (título, resumen, palabras clave y todo el contenido del documento). Dado lo anterior, se consideraron documentos detectados en las bases de datos seleccionadas tales como artículos, libros e informes científicos.

5.3.1.2. Sistema de análisis bibliográfico

El sistema de análisis bibliográfico consideró cuatro (4) etapas que se basaron según la frecuencia de citación de los indicadores socioambientales desde sus principales enfoques y variables propuestos para la evaluación de la calidad del agua y su aplicación a nivel mundial aplicados a fuentes subterráneas. De esta manera, se estableció un nivel de importancia por medio de cuartiles (Q) con el cual se relacionó el número de documentos detectados (Zafra et al., 2017). Para la revisión bibliográfica se tuvo en cuenta todos los campos de búsqueda de las bases de datos consultadas (i. e., título, resumen, palabras clave y todo el contenido del documento).

5.3.1.3 Etapas de análisis

Etapa 1: En el desarrollo de la primera etapa de búsqueda bibliográfica se utilizaron las siguientes combinaciones de palabras claves en inglés: socio-enviromental indicators water quality, (indicadores socioambientales, calidad del agua), las bases de datos utilizadas

para la consulta documental fueron: (i) ScientDirect, (ii) Scopus, (iii) SpringerLink y (iv) Google Scholar (Tabla 1).

Etapa 2: En esta etapa, se realizó la detección y análisis de información a nivel mundial. Se revisaron los primeros 50 documentos reportados por la base de datos ScienceDirect y Scopus para detectar mediante el filtro de búsqueda Publication title, subject areas, years (título de la publicación, áreas temáticas y años), lo cual es exclusivamente se encontraban relacionados con el objetivo de esta revisión bibliográfica. De acuerdo con la selección de estos documentos mediante la lectura de los resúmenes, índices, metodologías y resultados, se identificaron tres enfoques para la implementación de indicadores socioambientales asociados a fuentes hídricas subterráneas.

Etapa 3: Posteriormente, se realizó la revisión bibliográfica en la cual se incluyeron los tipos de indicadores en concordancia con las palabras claves y enfoques designados en la etapa 1 y 2, respectivamente. Para el desarrollo de esta etapa, se seleccionaron documentos para abordar las actividades enfocadas exclusivamente a la calidad del agua para consumo humano. Por otra parte, se toma en cuenta los enfoques propuestos en la etapa 2, teniendo en cuenta lo propuesto y revisado por Bergez (2021). A nivel mundial, se han catalogado los siguientes tipos de indicadores: indicadores conductores, indicadores de presión e indicadores de estado. De esta manera, se estableció un orden de importancia por medio de cuartiles (Q), con el cual se relacionó el número de documentos detectados en las dos primeras fases, Q presenta un intervalo entre 0 y 1; distribuido de la siguiente manera: Q1 = 0,75- 1,00, Q2: 0,50-0,75, Q3: 0,25-0,50, y Q4: 0,25-0,00. Conforme con lo anterior, el Q1 representa el cuartil con el mayor número de documentos citados con respecto al cuartil Q4 los cuales serían los menos citados. (Zafra, et al., 2017).

5.3.1.4 Análisis Estadístico

Para el análisis de los datos obtenidos, se empleó estadística descriptiva (promedio, media, deviación estándar y varianza), para cada uno de los elementos considerados en la revisión de enfoques, tipos, variables obtenidas para los indicadores socioambientales

aplicados en la evaluación de la calidad del agua, apoyado de herramientas estadísticas como Excel y el programa IBM SPSS Statics.

5.3.2. Proponer un índice socioambiental de la calidad del agua de consumo humano para las fuentes hídricas subterráneas de las áreas rurales del municipio de Cota (ISCAFS) a partir de índices propuestos e indicadores socioambientales de mayor impacto

Para la propuesta del índice socioambiental se ejecutaron una serie de tres (3) etapas; en la primera, se generó el reconocimiento y recopilación de la información a nivel bibliográfico de los indicadores con mayor citación bibliográfica; y de esta manera se generó una validación y acercamiento directo al territorio mediante instrumentos de recolección de información primaria puntual mediante encuestas semiestructuradas referentes y enfocadas a la calidad del agua para consumo humano del municipio de Cota. Posterior a ello, en la segunda etapa, se ejecutó una metodología sólida pertinente para la selección de los indicadores socioambientales de mayor impacto a utilizar en el índice; para esto, se eligió la metodología de Videla & Schroh (2000) combinada con el proceso del método Delphi, además de la aplicabilidad de la metodología Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, siglas en inglés) contando con la información obtenida de datos socioeconómicos y ambientales de las entidades públicas del municipio de Cota, para dar aplicabilidad a la metodología propuesta.

Finalmente, en una tercera etapa; conforme con los indicadores seleccionados se relacionaron los datos obtenidos de manera cuantitativa generando una asignación de porcentajes que permitieron ser incorporados en la ecuación propuesta para el índice socioambiental de calidad del agua para fuentes hídricas subterráneas (ISCAFS). El proceso, se basó en sustentos literarios buscando la adaptabilidad al índice propuesto por el Canadian Council of Ministers of the Environment, conocido como CCME_WQI (por sus siglas en inglés), al ser este uno de los más utilizados frente a cambios en diferentes investigaciones referidas. A continuación, se describe cada uno de los procesos en mención:

5.3.2.1. Diagnóstico preliminar del área de estudio

Se inició la preparación previa de indicadores socioambientales a través de la realización de observaciones en campo, mediante instrumentos metodológicos (aplicación de formatos de observación y encuestas semiestructuradas). Lo anterior, con el fin de generar el contraste de las condiciones del territorio, percepción de la población rural referente a la calidad del agua; en contraste con la búsqueda de literatura referente a los indicadores socioambientales a utilizar en esta investigación.

En las observaciones del trabajo en campo, se identificaron las cuatro (4) fuentes de agua subterráneas que abastecen agua para consumo humano y domésticos a las comunidades rurales en el municipio de Cota (Pozo El Abra, pozo Cetime, pozo la Moya y pozo el Salvio) . Estas fuentes fueron registradas y georreferenciadas para su caracterización oportuna de investigación (Ver Anexo 10). De igual manera se registran actividades agrícolas y ganaderas, que son factores de potencial impacto frente a la posible contaminación a las fuentes subterráneas y de evaluar en los indicadores; esto se ejecutó y plasmó mediante formatos de observación. Por otra parte, se hizo utilización de información proporcionada por la Secretaría de Salud del municipio de Cota, y de la Secretaría Agropecuaria y de Medio Ambiente, mediante informes técnicos, censos poblacionales, cartografía y los planes de uso eficiente y ahorro del agua - PUEAA.

Por otra parte, se aplicaron encuestas semiestructuradas (Ver Anexo 1), en las cuales las preguntas fueron enfocadas principalmente a comportamientos y percepciones de la comunidad rural con respecto a la calidad del agua para consumo humano. De igual manera se resalta que la comunidad indígena que pertenece al municipio se hizo partícipe de este instrumento de recolección de información. Además de ello, se contó con la ayuda de los presidentes de las juntas de acción comunal de las veredas rurales (La Moya, Cetime y el Abra). Estas encuestas contaron con una variedad de tipos de preguntas, incluyendo preguntas abiertas y cerradas, con opciones elección múltiple y respuestas según al criterio de vivencias específicas de los habitantes de las comunidades rurales, Campos, (2020). La selección de las preguntas estuvo determinada por la metodología semiestructurar, con el fin de generar una situación en donde la información obtenida por parte de los encuestados fuera

realmente significativa. Según Mendiola y otros (2006), considera que las preguntas abiertas que en esta investigación fueron un total de **nueve (9)** preguntas, "sirven en situaciones donde se desea profundizar una opinión o los motivos de un comportamiento", que para este caso de investigación fue bastante asertivo, ya que permitieron un acercamiento mucho más sólido frente a la identificación de diferentes factores de comportamiento y conocimiento de las condiciones de la calidad del agua.

De otra parte, para determinar el número de muestras representativas para la aplicación de encuestas en esta investigación, se hizo necesario establecer una fórmula integral desde una revisión literaria. Si bien, se tuvo en que éste dependerá del grado de representatividad que se tengan a estudiar. En este sentido, cabe considerar algunas opiniones de expertos en este tópico como Palella y Martins (2011), quienes expresan que diversos autores coinciden en señalar que una muestra de 10%, 20%, 30% o 40% puede ser representativa de la población acorde con su tamaño, que para este caso de investigación se seleccionó el 10%; el dato de la población rural (N) es obtenido mediante censos suministrados por la Secretaría de Planeación del municipio de Cota (Ecuación 1).

Según lo propuesto por (Arias, 2012; Fuente lsaz, 2004; Palella y Martins, 2011; Torres y otros, 2006), sugieren la siguiente fórmula:

$$n = \frac{(z\alpha)^2 pqN}{e^2(N-1) + pq(z\alpha^2)}$$

En donde:

n = tamaño de la muestra

zα= nivel de significación: (Para 95% es igual a 1,96)

e = margen de error: (0,24)

p = nivel de aceptación (ejemplo: 50% = 0,5)

q = nivel de rechazo (ejemplo: 50% = 0,5)

N = población total rural

Ecuación 1. Cálculo muestra representativa a encuestar

$$n = \frac{(1{,}96^2)x(0{,}25)x(1300)}{0{,}24^2(1300-1)+(0{,}25)x1{,}96^2} = 16{,}4 \approx \ 17 \text{ encuestas}$$

Fuente: Elaboración propia.

Para la selección de encuestados se tuvo en cuenta que sean informantes clave los cuales posibilitaron el contacto con otros actores vinculados con la temática en el área rural del municipio de Cota. Por otra parte, el análisis de los datos estuvo ejecutado mediante el procesamiento de la información que se realizó por medio del software SPSS versión 2 y Excel, con la finalidad de organizar los datos de manera asertiva.

5.3.2.2. Selección de indicadores socioambientales

La selección inicial de indicadores genéricos y específicos se realizó con base al análisis de la revisión bibliográfica, específicamente la investigación propuesta por Calvopiña, (2021), al estar asociada a indicadores con mayor impacto a fuentes hídricas subterráneas; además de identificar que los datos obtenidos mediante trabajo de campo mediante encuestas semiestructuradas; y la recolección de información pertinente y puntual por entidades del municipio se encontraban intrínsecamente asociados y permitían la realización óptima de la metodología a plantear, razón por la cual la selección de indicadores se ejecutó de la siguiente manera:

5.3.2.3. Aplicación de metodologías de selección para indicadores socioambientales

5.3.2.3.1. Metodología Videla & Schroh

Para la selección de los indicadores socioeconómicos, se evaluaron los indicadores utilizando la metodología de Videla & Schroh (2000) y el proceso del método Delphi, asignando una valoración pertinente de acuerdo con el criterio de seis (6) expertos y conocedores de las condiciones sociales y ambientales del municipio, con el fin de

seleccionar los potenciales indicadores del área de estudio. Si bien esta metodología, tiene la capacidad de recopilar información sobre un tema particular, a través de expertos que están en el territorio; además, genera información válida con criterios de selección mediante ponderación y puntuaciones objetivas (Munier, 2011). Esta evaluación para la selección de los indicadores consistió en aplicar los siguientes ocho (8) criterios de selección: **V*alidez científica, Representativos, Medibles, Comprensión, Calidad, Accesibilidad, Especificidad y Aplicabilidad.*** (Videla y Schroh 2000). Para esta metodología se definieron los indicadores con una descripción específica para cada subcriterio. Para obtener el dato exacto de cada indicador específico, se obtuvo la información de entidades como: Secretaría de planeación, Secretaría de Hacienda, Secretaría Agropecuaria y Medio Ambiente. Los datos, están proporcionados desde el año 2020 con actualización al 2023; de acuerdo con ello, se procedió hacer la debida evaluación con base a lo descrito en la Tabla 2. La ponderación y puntuaciones fueron determinadas bajo la siguiente escala, tomando en cuenta lo propuesto por Calvopiña (2021):

Tabla 2. *Puntuaciones asignadas a la metodología Videla y Schroh*

Medición de Impacto	*Valoración numérica*	*Asignación ponderada de impacto*
Alto - A	3	22-19
Medio - M	2	18-11
Bajo - B	1	10-8

Fuente: Elaboración propia

Una vez se realizó una valoración inicial como se describió anteriormente, fue importante determinar una valoración porcentual para evidenciar el impacto para cada uno de los indicadores específicos a evaluar, por ende, se aplicó una segunda fase o metodología que permitió ponderar de manera porcentual aquellos de mayor impacto en el municipio el cual se desarrolló de la siguiente manera:

5.3.2.3.2. Metodología Proceso del Análisis Jerárquico (AHP, siglas en inglés)

Para la realización de este proceso, se tomó como base principal lo establecido por la propuesta de investigación de Calvopiña (2021). El fundamento del proceso residió en el hecho de que esta metodología permite dar valores numéricos a los juicios dados por las personas expertas, logrando medir la contribución de cada elemento de la jerarquía respecto al nivel inmediatamente superior del cual se desprende (Loaiza, 2015); es decir, permitió que la valoración de indicadores estuviera enfocada en el propósito de identificar los de mayor impacto. Esta metodología se aplicó para cada uno de los indicadores genéricos seleccionados *(Calidad de vida, Educación, Residuos sólidos, Uso del suelo, Uso del recurso hídrico, Ingresos económicos y Conservación e investigación).* De igual manera, para cada indicador específico de estos indicadores genéricos se ejecutó el mismo procedimiento.

En un primer paso, se establece la matriz inicial A (Ver Anexo 2); la cual se obtuvo a partir de valores numéricos establecidos por los expertos basados en lo propuesto por Gokhale (2007) y Saaty (1990) los cuales proponen una escala de evaluación como se refleja en la Tabla 3.

Tabla 3. *Escala de evaluación proceso de análisis jerárquico (AHP)*

Escala numérica	Escala Verbal	Descripción
1	Igual importancia	Dos criterios contribuyen de igual forma al cumplimiento de objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un criterio sobre el otro
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un criterio sobre el otro
7	Importancia muy fuerte	Un criterio es mucho más favorecido que el otro; su predominancia se demostró en la practica

9	Importancia extrema	La evidencia que favorece un criterio sobre el otra, es absoluta y totalmente clara
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre los dos juicios adyacentes	Cuando se necesite trazar valores intermedios.

Fuente: Saaty, 1994

Para un segundo paso; se ejecutó una serie de procesos matemáticos y estadísticos según lo propuesto por Loaiza (2015), de conformidad con la metodología del proceso de análisis jerárquico; en donde se obtuvieron los datos para plantear una matriz normalizada de los datos. Por otra parte, con los datos obtenidos se establecieron los porcentajes de priorización y de impacto por cada uno de los indicadores genéricos y específicos a evaluar. (Ver Anexo 2 al 9). Finalmente, la validación de estas matrices consistió en el cálculo de consistencia propuesto por Gokhale (2007), reflejado en la ecuación 1:

Ecuación 2. Cálculo de consistencia

$$CR = \frac{CI}{IR}$$

Fuente: Gokhale, (2007)

Donde, (CI) es el índice de consistencia y, el (IR) es el índice aleatorio que representa el índice de coherencia de una matriz recíproca generada de escala 1 a 9 (Tabla 4). A continuación, se describe como se obtuvo el índice de consistencia (Ecuación 2) y el cálculo del índice aleatorio (Ecuación 3):

Ecuación 3. Cálculo de índice de consistencia

$$CI = \frac{(\lambda max - n)}{n - 1}$$

Fuente: Gokhale, 2007

Donde λmax, es el valor propio principal más grande, n es el número de elementos que se comparan. Para calcular el índice aleatorio (IR)se deben aplicar los valores de la Tabla 4:

Tabla 4. *Ponderación para determinar el Índice aleatorio*

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0,50	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fuente: Saaty, 1994

Ecuación 4.Cálculo de índice aleatorio

$$IR = \frac{1{,}98(n-2)}{n}$$

Fuente: Gokhale, 2007

Teniendo en cuenta lo ejecutado por las matrices normalizadas, es de gran importancia que si el CI<0,1 es considerado aceptable y cuando un CI>0,1, las opiniones y juicios deben ser reconsiderados (Calvopiña, 2021). Por lo tanto; para esta investigación se identificó que el cálculo de consistencia para las matrices evaluadas fue menor a 0,1; siendo esto aceptable para la validación.

5.3.2.4. Propuesta del índice socioambiental (ISCAFS)

La metodología propuesta para desarrollar el Índice Socioambiental de Calidad del Agua para consumo humano de fuentes hídricas subterráneas (ISCAFS), se desarrolló desde un enfoque integral en la selección de indicadores socioambientales y de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos a involucrar, teniendo en cuenta los factores de mayor impacto, de acuerdo con ello, la construcción del índice; parte también de revisiones bibliográficas conforme a los ICA´s (índices de calidad del agua). La estructura principal de la construcción del índice se basó en la normalización de los indicadores que los conforman de acuerdo con sus porcentajes asignados soportados por la literatura, para su posterior ponderación en función de la construcción del índice socioambiental para medición de la

calidad del agua para consumo humano en el área rural del municipio de Cota. Este índice se calculó mediante la integración de las ponderaciones de los parámetros a través de diferentes funciones matemáticas. Además de ello, se tomó en cuenta el siguiente enfoque para su cálculo: i) el producto ponderado en el cual los pesos o porcentajes dan importancia a los puntajes y todos ellos son ponderados (Torres et al, 2009).

Conforme con lo anterior, para la construcción del índice se desarrollaron los siguientes pasos:

5.3.2.4.1. Selección de indicadores socioambientales y parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de la calidad del agua para consumo humano

- **Indicadores socioambientales:**

Para la selección de los indicadores socioambientales, se hizo la descripción detallada anteriormente, bajo la cual se generaron una serie de actividades para la aplicación de las metodologías propuesta por Videla & Scroh. El proceso de análisis Jerárquico (AHP siglas en inglés); y el método Delphi, que permitieron la selección de aquellos indicadores que son de mayor impacto para el área de estudio. Estos indicadores, se establecieron de forma porcentual (%) clasificados en indicadores genéricos y específicos lo que permitió su ponderación e incorporación al índice socioambiental propuesto (ISCAFS). Los siguientes son los indicadores socioambientales genéricos seleccionados: *Calidad de vida, Educación, Residuos sólidos, Uso del suelo, Uso del recurso hídrico, Ingresos económicos, Conservación e investigación.*

- **Parámetros fisicoquímicos y ensayos que evaluar en el índice socioambiental**

Para esta selección, se procedió a recolectar la información de las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas de calidad del agua para consumo humano, mediante tomas de muestras puntuales ejecutadas por el Laboratorio H_2O es Vida S.A.S, autorizado por el Ministerio de Salud bajo la Resolución 0172 del 2022. La información reportada se realizó

en el marco de tres (3) ensayos realizados para el año 2023, en diferentes periodos (mayo, junio y septiembre) en cuatro (4) fuentes hídricas subterráneas para el abastecimiento de la población rural del municipio: pozo el Abra (N. 04° 48' 12,5" W. 74° 06' 47,4"); el Salvio (N. 04° 49' 38,2" W. 74° 05' 47,5"); de acuerdo con ello, se desarrolló una identificación de estos (Ver Anexo 10).

Por lo anterior, para los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, se tuvo en cuenta que no se especifica un número máximo de parámetros, pero se tomó en cuenta que es recomendable, que, para el cálculo del índice, se empleen como mínimo cuatro parámetros del que se tengan al menos dos valores o muestreos (Rojas et.al, 2010). Para este caso de estudio se determinaron un total de 34 parámetros fisicoquímicos-microbiológicos, teniendo un total de 102 ensayos; se menciona que se realizó uno (1) por cada parámetro con el fin de obtener una información detallada del comportamiento de la calidad del agua para consumo humano, los cuales fueron seleccionados de conformidad con la Resolución 2115 de 2007 expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Protección Social, Colombia *"Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano."* y para efectos de la aplicación del índice. Los siguientes son los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos seleccionados: *Conductividad, pH, turbiedad, color aparente, fluoruros, calcio, alcalinidad, cloruros, aluminio, dureza total, hierro, magnesio, coliformes totales (NMP), coliformes termotolerantes (NMP), nitratos, nitritos, sulfatos, olor y Sabor, antimonio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, selenio, COT, manganeso, molibdeno, zinc, cryptosporidium y giardia.*

5.3.2.4. 2. Propuesta de la ecuación del índice socioambiental ISCAFS

La metodología desarrollada para la determinación del índice socioambiental de medición de la calidad del agua (ISCAFS) se consideró desde la selección de indicadores socioambientales con mayor impacto en el territorio con el fin de lograr un análisis holístico de las condiciones de la calidad del agua para consumo humano; pero además de ello, se

consideraron los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de medición. A continuación, se detalla de la construcción de la ecuación a generar de acuerdo con revisión bibliográfica.

Este proceso tiene como propósito la transformación de las variables y parámetros de una escala dimensional a una adimensional para permitir su agregación teniendo en cuenta los socioambientales seleccionados. Según Fernández y Solano (2005), se pueden utilizar varios métodos, sin embargo, para esta investigación se aplicó el valor nominal o numérico, el cual consiste en la comparación del valor del parámetro con un estándar o criterio. Para lograr la incorporación en el índice, se ejerció lo propuesto por Samboni et al, (2017), que una vez se tiene la información homogeneizada de todos los indicadores seleccionados, se determinó la manera de unificar la información final mediante la integración de estos, que se estableció por medio de fórmulas de agregación matemática que para este caso de estudio (Ver Ecuación 5). La fórmula matemática o ecuación, se basó en lo propuesto por Hidalgo & Espinosa (2014), tomando como referencia el índice Canadian Council of Ministers of the Environment, conocido como CCME_WQI (por sus siglas en inglés) debido a que en la construcción de este índice implica la simplificación de procesos en comparación a otros índices (Alberti & Parker, 1991). Para el caso de esta investigación este

Una vez se tiene la información homogeneizada de todos los parámetros seleccionados, hay que mirar la manera de unificar la información final. La integración de los subíndices determina el índice de calidad de agua, que puede darse por medio de fórmulas de agregación matemática (Samboni et. al, 2007), que, para el caso de esta investigación, se utilizó el "Promedio ponderado" modificado a través del índice como CCME_WQI (por sus siglas en inglés). Por lo tanto, para el cálculo del índice socioambiental se necesitaron tres (3) factores, los cuales fueron utilizados al obtener la información de las tomas de muestras realizadas en las fuentes subterráneas denominados de la siguiente manera:

1. **F1 (alcance**): Obtener el porcentaje de alcance del índice

$$F1 = \frac{Parámetros\ fallidos}{Total\ de\ parámetros} * 100$$

2. **F2 (frecuencia)**: Obtener el porcentaje de la frecuencia en el índice

$$F2 = \frac{Ensayos\ fallidos}{Total\ de\ ensayos} * 100$$

3. **F3 (amplitud)**: Este factor se calcula en tres (3) fases:

$$Excursión\ i = \left(\frac{Valor\ fallido}{Valor\ normado}\right) - 1$$

En el caso que el valor calculado no deba ser menor que lo normado se calcula de la siguiente forma:

$$Excursión\ i = \left(\frac{Valor\ normado}{Valor\ Fallido}\right) - 1$$

- A continuación, se calcula la suma normalizada

$$nse = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} Excursión\ i}{Total\ de\ ensayos}\right)$$

Donde nse, es el valor intervalo en escala de la fórmula.

- Finalmente, el factor F3 se calcula mediante la formula siguiente:

$$F3 = \left(\frac{nse}{0.01\ nse + 0.01}\right)$$

Teniendo en cuenta los pasos anteriores, se obtiene la siguiente formulación:

Ecuación 5. Índice Canadiense para medición de calidad del agua ($CCME_WQI$)

$$\text{CCME_WQI} = 100 - \left\{\frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1732}\right\}$$

Fuente: CCME_WQI, (2001).

Lo anterior, se presenta como la base fundamental para la generación del índice socioambiental para esta investigación, ya que a diferencia de otros índices este tiene como ventaja que no requiere la realización de transformaciones a los parámetros que participan en la evaluación y evita la subjetividad de asignación de cálculos. (Rojas et. al, 2010). Dado a que se ejecutó una metodología estructurada referente a la obtención de los indicadores socioambientales, se complementó la ecuación referente, con los resultados de porcentaje de impacto (%) obtenidos por cada indicador específico. Este procedimiento fue de vital importancia ya que permitió la ponderación y obtención de escalas de medición de manera porcentual generando una unificación de unidades y medidas para la determinación de los resultados a obtener en el índice propuesto.

Seguido a ello, se incorporó los pesos porcentuales de valoración de los indicadores socioambientales seleccionados mediante el método del promedio ponderado modificado; de igual manera se asignó el valor de 1.732[1] en la ecuación el cual permitió normalizar el resultado a un valor entre 0 y 100, donde 0 representa la "peor" calidad y 100 la "mejor" calidad de agua, para lo cual los diferentes autores definen un rango, estos en algunos casos se les asigna un color, por lo tanto, para la construcción del índice socioambiental se designaron cinco (5) categorías dependiendo del valor obtenido se clasifica en un rango numérico, una designación de código de colores, clase a la que corresponde, y una descripción de la calidad del agua para consumo humano : ***excelente, buena, regular, crítica y muy crítica.***

5.3.3. Validar el índice socioambiental propuesto a través de diferentes análisis y determinar si estos son suficientes para evidenciar su posible comportamiento en las fuentes subterráneas del área rural del municipio de Cota.

La metodología implementada para la validación se desarrolló de conformidad con una revisión inicial bibliográfica para generar la aplicabilidad a los datos recopilados y

[1] Este valor fue seleccionado porque es el propuesto por el índice Canadiense (CCME_WQI) para la normalización estandarizada en su ecuación y lograr la designación de valores en la escala.

evaluar su comportamiento dentro del índice propuesto, de este modo se implementó una prueba piloto aplicando la propuesta del índice (ISCAFS) con el fin de evidenciar su comportamiento de una manera inicial; una vez esta se ejecutó, se evidenció que el generar una validación mediante un contraste y comparación correlacionados a otros índices de calidad del agua y de calidad del agua para consumo humano permitiría obtener otro panorama de la propuesta del índice. Al evidenciar los resultados obtenidos se logró identificar que la propuesta del índice (ISCAFS) en el cálculo de los indicadores específicos de corte socioambiental se convirtió en un aspecto “fijo” o de escasa variación y prácticamente sus datos equivalentes cuando se aplicó a las cuatro fuentes no permitió identificar una variación significativa, dado lo anterior, se decidió implementar una análisis de sensibilidad y un análisis de varianza (ANOVA) mediante la herramienta Python con el fin de observar la influencia de cada variable en la propuesta del índice socioambiental; además de ello identificar si estos fueron suficientes para evidenciar su comportamiento en el área rural del municipio de Cota. Conforme con lo anterior, se describe a continuación de manera detallada la ejecución de los análisis propuestos para la validación de la propuesta (ISCAFS):

5.3.3.1. Aplicación de prueba piloto en las fuentes subterráneas

Se procedió a aplicar la ecuación en función del índice socioambiental (ISCAFS) para dos (2) de las fuentes hídricas subterráneas ubicadas en las áreas rurales del municipio de Cota, para este caso se seleccionaron las fuentes el Abra (N. 04° 48' 12,5" W. 74° 06' 47,4") y el Salvio (N. 04° 49' 38,2" W. 74° 05' 47,5"), la Moya ((N. 04° 49' 11,06" W. 74° 06' 8,47") y Cetime (N. 04° 49' 14,0" W. 74° 06' 14,2"), al ser consideradas las de mayor uso por parte de la población del área rural del municipio.

Para la aplicabilidad del índice propuesto, se toman tres (3) ensayos para los periodos de los meses de febrero, junio y octubre del año 2023, con el fin de identificar el comportamiento y variabilidad de la calidad del agua para consumo humano; además de tener en cuenta lo propuesto a nivel metodológico mediante revisión literaria con referentes investigativos. Las muestras puntuales referentes a los parámetros fisicoquímicos a analizar

fueron tomadas por el Laboratorio H_2O, el cual se encuentra autorizado por el Ministerio de Salud de conformidad con la Resolución 0172 /2022, ejecutando y relacionando el siguiente procedimiento:

1. Se organizó el material de campo y se planea el muestreo en el formato F01-PT02 “Plan de Muestreo y Cadena de Custodia” siguiendo los lineamientos establecidos en el procedimiento “Toma de muestras”.
2. Se identificaron los puntos de muestreos por parte del profesional y se valida la información relacionada en los formatos con el contacto en campo
3. La toma de muestra se realizó de acuerdo con lo establecido en el instructivo “Toma de muestra de Agua potable”.
4. Los datos obtenidos en las diferentes mediciones se registran en el formato de caracterización In-Situ F05-PT01 “Caracterización In Situ – Agua Potable”.
5. La custodia de las muestras fue la actividad de seguimiento o monitoreo continuo a las muestras de ensayo desde la toma, identificación, preservación, refrigeración, dosificación, embalaje y transporte, hasta la recepción en el laboratorio, para su posterior análisis buscando protegerla de cualquier factor externo que pueda alterar su integridad.
6. Luego de la toma de muestra, esta es envasada de acuerdo con lo indicado en el formato F01-PT02 “Plan de Muestreo y Cadena de Custodia”, e identificada mediante el F02-PT02 “Rótulo de muestras” indicando tipo de muestreo, parámetros a analizar y preservación aplicada.
7. A su llegada al laboratorio se verificó temperatura y preservación, para posteriormente realizar el registro de las muestras mediante la asignación de Código de acuerdo con lo establecido en el PT02 “Procedimiento de Recepción, Manejo y Transferencia de Muestras”.

Una vez se obtuvieron los resultados, se ejecutó la aplicabilidad del índice socioambiental propuesto (ISCAFS) mediante la ejecución de la ecuación evidenciando la clasificación de la calidad del agua para las dos fuentes subterráneas evaluadas, esto permitió identificar el comportamiento inicial de validación del índice.

5.3.3.2. Análisis comparativo-índices de calidad del agua para consumo humano

Conforme con el índice propuesto (ISCAFS), se decidió generar un proceso de análisis comparativo entre el ya propuesto, y de acuerdo con el estudio generado por Samboní et. al, (2017), seleccionar el IRCA (índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano, 2007); y el Índice Canadiense para medición de calidad del agua (CCME_WQI) (ver Tabla 17), esto con el fin de aplicarlos para las fuentes de abastecimiento subterráneas, que para el caso de estudio se ejecutaron las cuatro (4) existentes en el municipio (Abra, Salvio, Moya y Cetime). Conforme con lo anterior, se busca identificar la existencia de varianzas significativas en el comportamiento de la evaluación de la calidad del agua para consumo humano; se resalta que el índice del IRCA no está desarrollado con indicadores socioambientales ni el índice Canadiense; más, sin embargo, el análisis comparativo está determinado para la valoración de los parámetros fisicoquímicos de la calidad del agua para consumo humano. Por lo tanto, teniendo en cuenta lo anterior, en el proceso de comparación se realizó asignación de pesos ponderados para dar aplicabilidad a las ecuaciones de cada uno de los índices establecidos.

Para la aplicación de esta comparación se detalla a continuación las ecuaciones propuestas a analizar de la siguiente manera:

Ecuación 6. Índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano (IRCA)

$$IRCA = \frac{\sum \text{puntaje de riesgo asignado a las características no aceptables}}{\sum \text{puntaje de riesgo asignados a todas las características analizadas}} X\ 100$$

Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Protección Social, 2007.

5.3.3.3. Prueba de Análisis de sensibilidad y Análisis de Varianza (ANOVA)

Una vez establecido el índice (ISCAFS), se decidió implementar la ejecución de una prueba de análisis de sensibilidad inicial, análisis de varianza (ANOVA) y análisis de sensibilidad mediante la herramienta Python con el fin de identificar cómo este logra comportarse en escenarios de variabilidad, además de ello, es beneficioso por su capacidad

de automatización, flexibilidad, y poder de análisis, lo cual permitió evaluar de manera precisa cómo diferentes variables afectan el resultado de sus modelos. Esto contribuye a la toma de decisiones más informada y basada en datos, asegurando la fiabilidad y validez de los resultados obtenidos. Con base a lo anterior, este proceso metodológico permitió identificar la variabilidad del índice socioambiental (ISCAFS) de conformidad con su validación, si bien, el generar una prueba de análisis permitió observar el comportamiento de este.

- **Análisis de Sensibilidad Inicial**

1. **Variación de variables (F1, F2 Y F3):** Se generaron porcentajes posibles para la variación de los ítems F1,F2,F3 en las fuentes hídricas subterráneas del área de estudio.
2. **Cálculo de Nuevos Índices:** Se calcularon los nuevos valores con escenarios propuestos que permitan evidenciar si existe variabilidad del índice socioambiental propuesto.

- **Análisis de Sensibilidad con Python y Análisis de Varianza (ANOVA)**

1. **Preparación de Datos**: Se recopiló la información de los datos de la propuesta del índice socioambiental y se preparó para el cálculo de este.
2. **Implementación del Índice**: Se codificó la fórmula del índice socioambiental ISCAFS propuesto en Python.
3. **Variación de Indicadores**: Se realizaron variaciones sistemáticas de los valores de los indicadores socioambientales comprendiendo variaciones de (100, 10 y 30) de forma aleatoria.
4. **Evaluación de Resultados**: Se analizaron cómo las variaciones afectan el índice socioambiental.
5. **Implementación del ANOVA**: Se utilizaron bibliotecas estadísticas en Python (e.g., SciPy, StatsModels).
6. **Interpretación de Resultados**: Se evaluó la significancia estadística de las diferencias entre grupos.

6. Resultados y Discusión

El desarrollo de la investigación se basó en la realización de las actividades diseñadas y planteadas de una manera estructural y secuencial de los objetivos específicos propuestos de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

6.1. Analizar el estado de conocimiento de los índices socioambientales de calidad del agua subterránea en el contexto nacional e internacional.

En la primera fase de revisión de literatura para las palabras clave indicadores socioambientales, calidad del agua, se encontró un total de 38.861 documentos en las cuatro bases de datos. La base de datos con mayor número de documentos detectados fue Google Scholar (17.800; 45,8%), seguida por ScienceDirect (9.026; 23,23%), Springer Link (8.035; 20,67%) y Scopus (4.000; 10,29%), como se identifica en la Tabla 5.

Tabla 5. *Resultados obtenidos de la revisión literaria a nivel mundial de indicadores*

Etapa	Palabras clave	Google Académico		Science Direct		Springer Link		Scopus		Índice medio	Cuartil Medio
		DD	(Q)	DD	(Q)	DD	(Q)	DD	(Q)		
1	Indicadores socioambientales, calidad del agua, Fuentes hídricas subterráneas	17.800	1,0	9.026	1,0	8.035	1,0	4.000	1,0	_	_
2. Enfoques	Evaluación del ciclo de vida	38.820	0,32	1.156	0,12	7.967	1,0	335	0,084	0,85	Q1
	Evaluación de servicios ecosistémicos	30.090	0,17	2.410	0,26	1.000	0,12	411	0,10	0,55	Q2
	Evaluación de rendimiento	20.073	0,11	77	0,009	74	0,009	24	0,006	0,29	Q3
3. Tipos	Conductores	16.700	0,93	604	0,06	36.106	4,4	17	0,004	1,0	Q1
	Presión	16.300	0,91	2.995	0,33	83.690	4,5	13	0,015	1,0	Q1

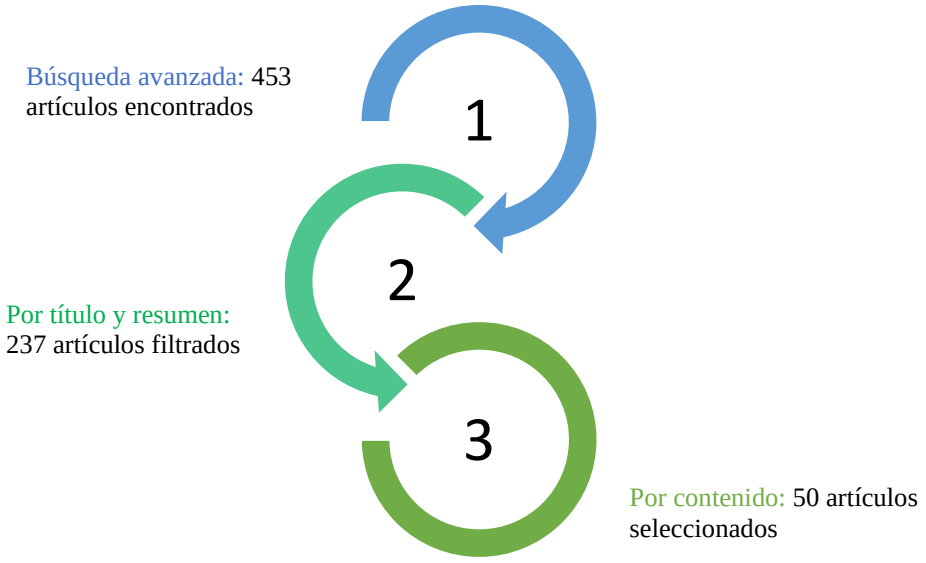
de indicadores	Estado	3.170	0,17	400	0,04	2.076	0,2	14	0,013	0,12	Q4
4.Indicadores genéricos	Calidad de vida y servicios	19.000	1,0	106	0,012	30	0,003	61	0,01	0,27	Q3
	Política pública	13.340	0,74	84	0,009	75	0,01	50	0,01	0,20	Q4
	Ingresos y Economía	16.800	0,94	63	0,007	61	0,01	63	0,01	0,24	Q4
	Uso del suelo y cobertura vegetal	21.600	1,2	273	0,03	59	0,01	170	0,04	0,32	Q3
	Tratamiento de residuos	17.500	0,98	56	0,006	84	0,01	73	0,01	0,25	Q3
	Conservación e investigación	19.300	1,0	74	0,008	118	0,01	85	0,02	0,28	Q3

Nota: DD: Documentos detectados; Q: Índice promedio de frecuencia de citación.

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un análisis en contraste con los 50 artículos de revisión con el fin de identificar la relación dada a partir de los enfoques, tipos y variables, a partir de ello se evidencia que el enfoque de evaluación de calidad de vida está intrínsecamente ligado con indicadores de tipo presión y conducción que suelen estar involucrados ingreso y economía, uso del suelo, uso del recurso hídrico, tratamiento de residuos representando en 54% de citación y relación entre ellos. En cuanto al enfoque de evaluación de los servicios ecosistémicos se encuentra vinculado con mayor afinidad a los tipos de indicadores de presión representando el 38% de citación para la relación de las variables; y el enfoque de evaluación de rendimiento está asociado a indicadores de estado con el 8% (Figura 4).

Figura 2. Esquema del proceso de selección de los 50 artículos utilizados en el estudio



Fuente: Elaboración propia

El software Excel se utilizó para tabular los datos de los documentos seleccionados. Los datos tabulados incluyeron: autores, año de publicación, país donde se realizó la investigación y palabras claves. De los 237 artículos se seleccionaron 50 artículos de interés tomando como criterio de selección una frecuencia superior a 10 citaciones; sin embargo, también fueron incluidos aquellos artículos que no cumplieron con este criterio debido a ser de reciente publicación pero que si realizaban una contribución aplicable al contexto de estudio. Finalmente, se realizó una reflexión crítica sobre las tendencias de investigación que permita identificar brechas o vacíos de investigación en este tema. A partir de lo anterior, y tomado lo propuesto por Bergez (2021) y en consecuencia del desarrollo de las actividades humanas estas deben estar enfocadas a no exceder la capacidad de carga de la naturaleza, es decir, los sistemas ecológicos, deben generar un análisis frente a las condiciones de la calidad de vida, conforme con la parte socioeconómica de los recursos hídricos (Therond et al., 2017).

El enfoque de evaluación de ciclo de vida, destacado por investigadores como Hayo van der Werf, Olivier Therond y Nicolas Guilpart, reflejado en el artículo de Bergez (2021), se considera valioso por su capacidad para abordar cadenas de producción, efectos directos

e indirectos, así como situaciones de aguas superficiales y subterráneas, siendo este último aspecto a menudo pasado por alto en muchos estudios. En contraste, el enfoque de evaluación de servicios ecosistémicos se centra en perspectivas territoriales específicas, como paisajes o agroecosistemas. El enfoque de ciclo de vida se utiliza cada vez más para analizar cadenas de productos alimentarios en diferentes paisajes y regiones del mundo que a su vez han generado comportamientos significativos en las dinámicas de las condiciones de calidad del agua en fuentes hídricas (Bocksteler et. al, 2008).

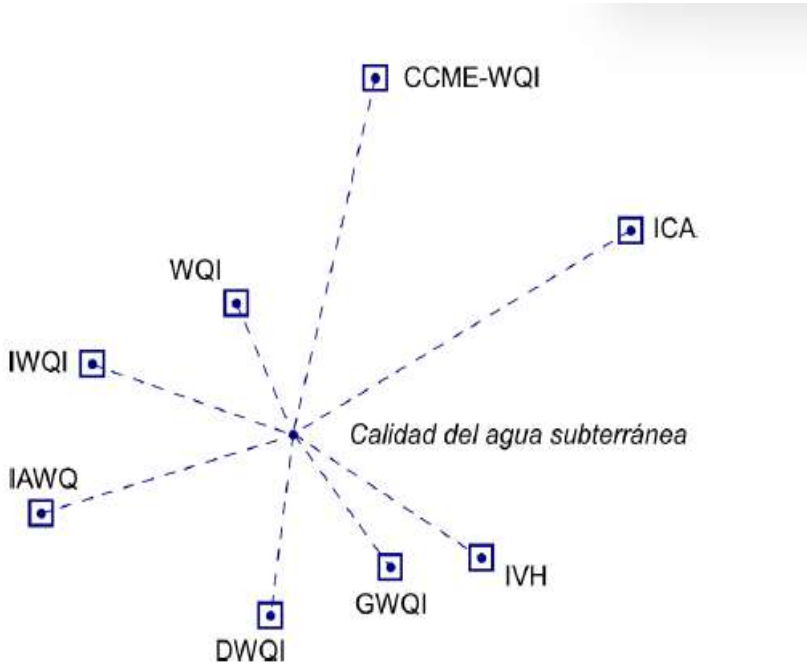
Por otra parte, para representar los resultados de manera íntegra, y en concordancia con Bockasteler (2008), dentro de la revisión bibliográfica, se estructuró el conjunto de datos de los tipos de indicadores teniendo en cuenta el Driver-Pressure-State-Impact-Marco de respuesta (DPSIR), el cual es una herramienta para analizar todas las relaciones causa-efecto de un sistema entre la actividad humana y el medio ambiente, lo cual ha permitido organizar y seleccionar indicadores (Alkan Olsson et al., 2009).

Según Gabrielsen y Bosch (2003), un indicador tipo conductor es relevante frente a un cambio en el estilo de vida, el nivel general de consumo y el patrón de producción, o la motivación para un uso específico de la tierra, lo que conlleva su gran importancia en su implementación a nivel mundial, para lo que en esta revisión bibliográfica se identifica su mayor utilización (García et al., 2020). En cuanto a los indicadores de presión en la calidad del agua, a través de la emisión de sustancias, agentes físicos y biológicos o incluso herramientas técnicas, y el uso de recursos por parte de las actividades humanas, se logra generar una alteración en el estado del medio ambiente, y estos a su vez generan flujos de reacción en cadena que impactan el medio ambiente y la provisión de beneficios ecosistémicos y el sistema socioeconómico. Si bien, esto conduce a una respuesta social y política, que se refiere a las acciones que llevan a cabo desde la sociedad y los gobiernos para minimizar los efectos negativos sobre el medio ambiente, (Salou et al., 2017).

Por otra parte, se realizó una búsqueda sistemática, conforme a las brechas de investigación sobre temáticas asociadas al estudio del agua subterránea. La Figura 3 presenta el diagrama de co-ocurrencia de los principales índices empleados para evaluar la calidad del agua subterránea, presentando que índices como “WQI”, “GWQI” y “IWQI” (por sus siglas en inglés Water Quality Index, Ground-Water Quality Index y Integrated

Water Quality Index, respectivamente) han sido ampliamente empleados a nivel mundial en diferentes estudios de calidad del agua. Aunque existe similitud entre los índices desarrollados también hay diferencias significativas en los criterios y en la metodología establecida para cada uno, lo que condiciona su uso universal dado que algunas diferencias son en función de características ambientales propias del acuífero u objetivos del estudio (Ceron et. al, 2021).

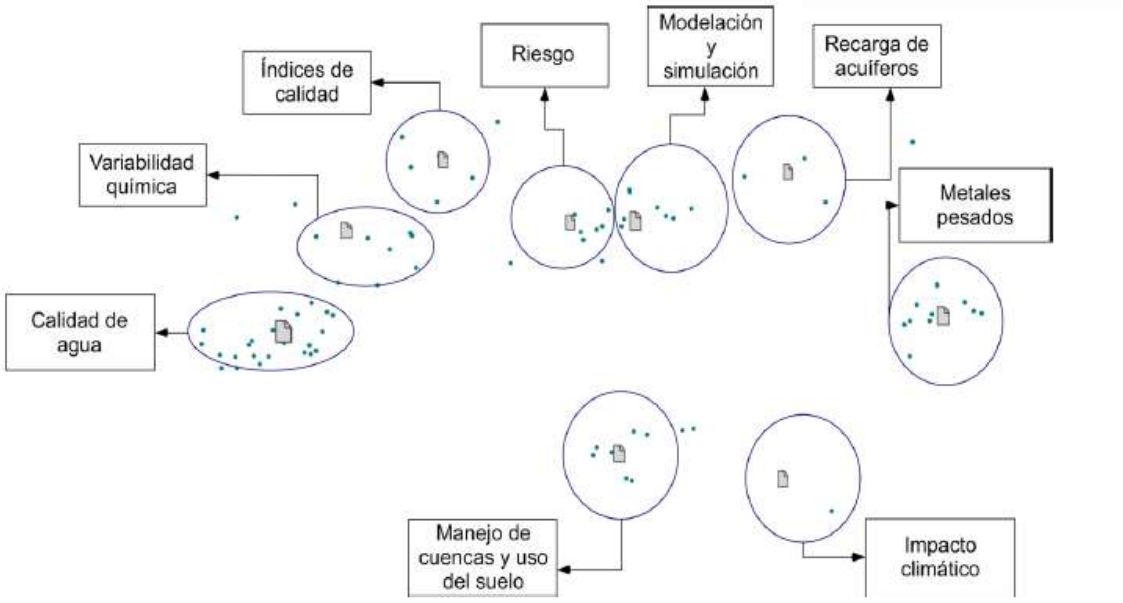
Figura 3 Co-ocurrencias de palabras en torno a los índices de calidad



Fuente: (Ceron et. al, 2021)

Durante el periodo comprendido entre 2014 y 2023, se encontraron 237 artículos que muestran la pertinencia de ahondar en diferentes campos de investigación. La Figura 4, muestra las galaxias conformadas del procesamiento de la información con el software RefViz.

Figura 4. Tendencias investigativas en agua subterránea en el periodo 2014-2023



Fuente: Adaptado (Ceron et. al, 2021)

Se identificaron nueve (9) estudios que aportan información sobre las tendencias de investigación en la gestión del agua subterránea, los cuales se agruparon en cuatro ejes temáticos: i) Cuencas y uso del suelo; ii) Modelado e impacto climático; iii) Estudios hidrogeológicos; y iv) Calidad del agua subterránea. La proximidad entre los puntos de cada grupo indica una mayor congruencia entre los temas abordados.

Se destacó que la calidad del agua ha sido un área de investigación en auge a nivel mundial durante los últimos diez años. Esto se refleja en la diversidad de países de diferentes continentes donde se han realizado estudios, el número de publicaciones sobre este tema y la cantidad de citas que estos artículos han recibido. Asegurar la calidad del agua para consumo y reducir los riesgos asociados a su uso se ha convertido en una preocupación central en la gestión integrada de los recursos hídricos. Por lo tanto, el monitoreo ambiental para evaluar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas es uno de los principales ejes a considerar en la conservación de los recursos hídricos y en el desarrollo de políticas dirigidas a su protección (Ceron et al., 2021).

La revisión realizada proporcionó una visión integral del estado actual de la investigación en cuerpos hídricos subterráneos destinados al abastecimiento de agua potable. Se observó que no todos los estudios se han centrado específicamente en estas fuentes, pero se destacó la importancia crucial de definir adecuadamente los indicadores sociales y ambientales en los territorios donde se planea llevar a cabo investigaciones de este tipo.

Esta investigación se enfocó en identificar y establecer los indicadores más citados a nivel mundial, así como en analizar su organización y categorización. Este enfoque proporcionó una comprensión más clara y metodológicamente sólida para la selección de estos indicadores en la creación del índice destinado a determinar la calidad del agua para consumo humano en las áreas rurales del municipio de Cota, Cundinamarca.

6.2. Proponer un índice socioambiental de la calidad del agua de consumo humano para las fuentes hídricas subterráneas de las áreas rurales del municipio de Cota (ISCAFS) a partir de índices propuestos e indicadores socioambientales de mayor impacto.

6.2.1. Diagnóstico preliminar del área de estudio

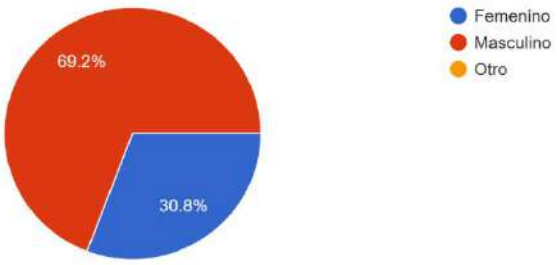
De acuerdo con los resultados del instrumento informativo derivado de la encuesta llevada a cabo, se pone de manifiesto una preocupante percepción dentro de la comunidad rural del municipio. Esta percepción se refiere principalmente a las deficientes condiciones de la calidad del agua proveniente de fuentes hídricas subterráneas. Además, se señala la falta de información adecuada con relación al uso, las acciones de mejora y la relevancia del cuidado del recurso hídrico en cuestión. Cabe destacar que, inicialmente, se tenía previsto realizar un total de 16 encuestas de acuerdo con la metodología propuesta. Sin embargo, en la práctica, la comunidad demostró un notable interés en participar y compartir sus puntos de vista, lo que llevó a la ejecución de un total de 25 encuestas. Este gesto de colaboración refleja el compromiso de la comunidad en contribuir a la recopilación de información relevante. Por otro lado, es importante mencionar que la comunidad del Resguardo Indígena Muisca de Cota, ubicada en la zona rural del municipio, expresó su insatisfacción con las condiciones actuales del recurso hídrico. A pesar de esta preocupación, optaron por participar

en la encuesta, citando experiencias previas que han generado desconfianza en la realización de este tipo de estudios.

A continuación, se relacionan los resultados obtenidos de las preguntas en ejecución de la encuesta (Anexo 1):

- **Género**

Figura 5. *Resultados género encuestados*

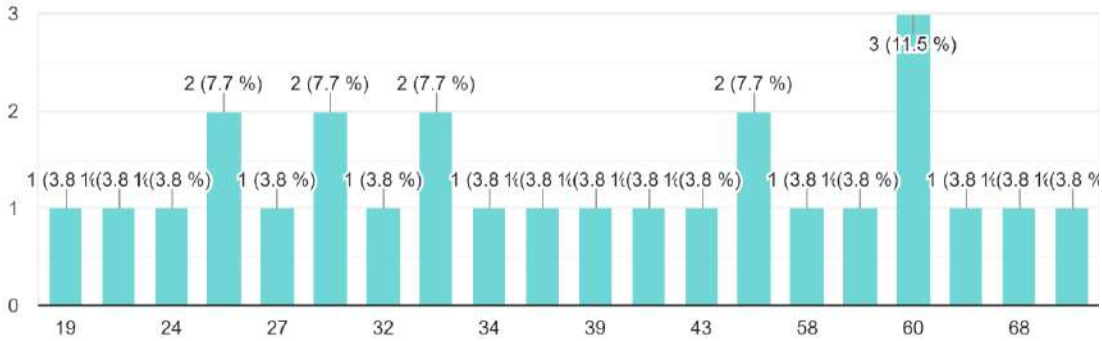


Fuente: Elaboración propia.

Se identificó que la población que presentó mayor participación en la encuesta, se en marca en el género masculino con un 69,2% del total de las personas a las cuales se aplicó la encuesta.

- **Edad**

Figura 6. *Resultados rangos de edad encuestada*

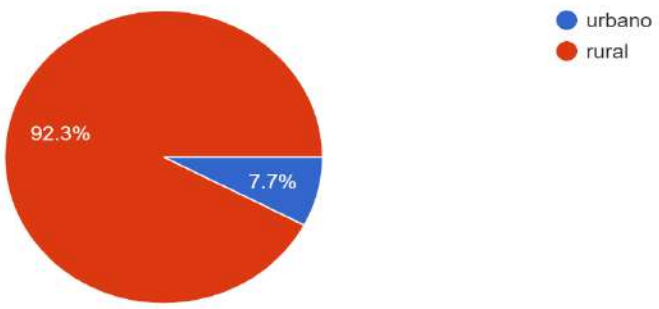


Fuente: Elaboración propia.

Se identificó que la población que presentó mayor participación en la encuesta se encuentra en las edades entre 25 a 60 años.

- **Sector de residencia**

Figura 7. *Resultados sector residencial*

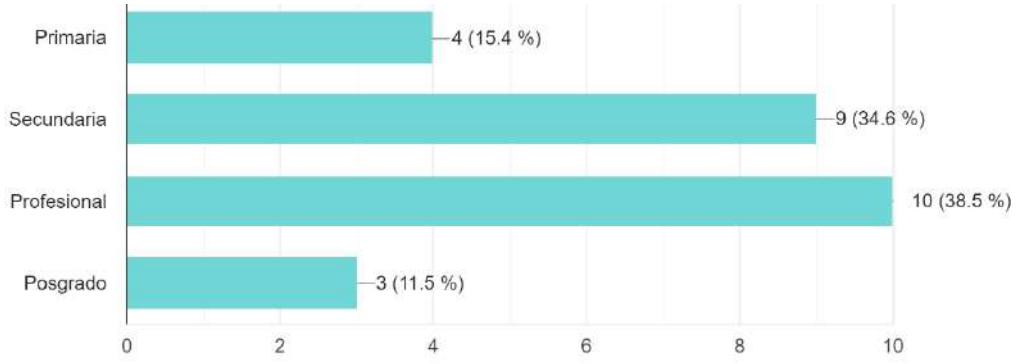


Fuente: Elaboración propia.

Se identificó que la población que presentó mayor participación en la encuesta se encuentra en el sector rural, propio del estudio de esta investigación, con un 92,3%.

- **Nivel educativo**

Figura 8. *Resultados Nivel Educativo*



Fuente: Elaboración propia.

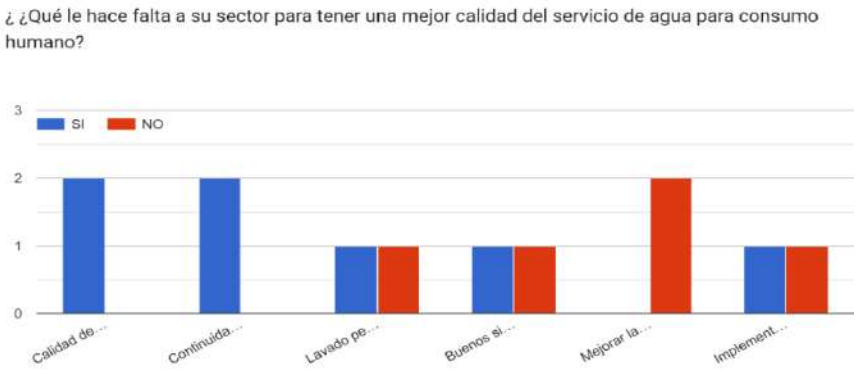
Se identificó que la población que participó presenta un nivel educativo profesional, representado el 38,5% del total de personas encuestadas.

- **Preguntas sobre el conocimiento y acciones de la calidad del agua para consumo humano**

El 80% de la población rural encuestada desconoce el origen del agua destinada al consumo humano, revelando una falta fundamental de conocimiento sobre esta fuente vital. Además, se observó que no se realiza regularmente la limpieza de los tanques de almacenamiento de agua para consumo humano, generando preocupaciones significativas sobre la higiene y calidad del agua consumida. Es relevante señalar que estos hallazgos provienen de datos recopilados en una comunidad fuera del resguardo indígena, lo que destacó la importancia de considerar diferencias demográficas en la percepción y manejo del recurso hídrico. Este aspecto puede ser clave para desarrollar políticas y prácticas más efectivas en la gestión del agua en entornos rurales, subrayando la necesidad de estrategias específicas al interactuar con comunidades que no han tenido experiencias satisfactorias en este ámbito, según evidencia la investigación. (Nasirian, 2007; Calvo, 2013).

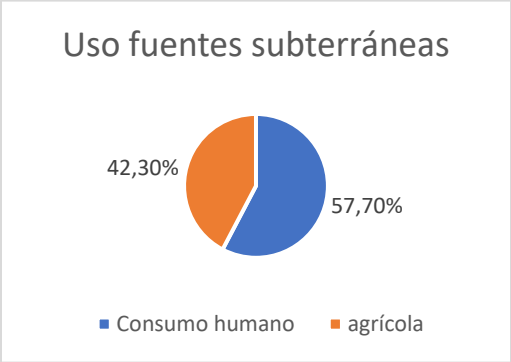
Se evidenció mediante lo planteado en la Figura 9 y Figura 10, que la población del área rural del municipio consideró que la calidad del agua para consumo humano |debe mejorar considerablemente al ser el uso con mayor impacto de las fuentes hídricas subterráneas.

Figura 9. *Resultados condiciones mejora de la calidad del agua*



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. *Resultados uso fuentes subterráneas*



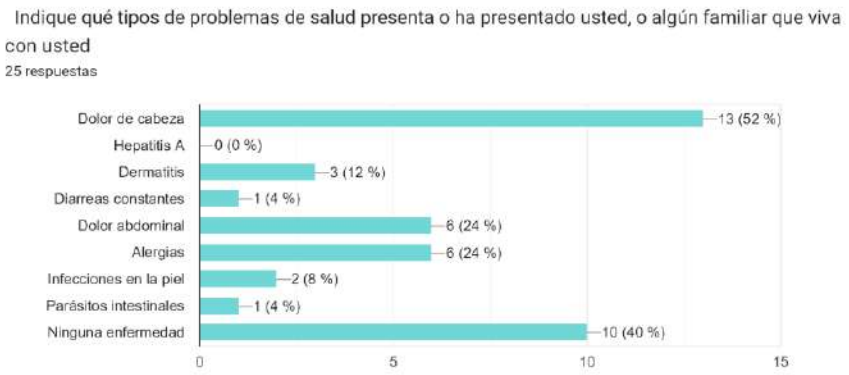
Fuente: Elaboración propia.

En los resultados de la encuesta, se destacó la preocupación principal de la población encuestada sobre las condiciones de calidad del agua, abordando aspectos como color, turbidez y parámetros fisicoquímicos (pH y cloro residual libre). El 93,5% de los participantes expresó inquietud acerca de la calidad del agua y la continuidad del servicio. Además, se observó que el 57,7% de los encuestados identificó el uso primario del agua de fuentes subterráneas en actividades relacionadas con el consumo humano, mientras que el 42,3% lo destinó a uso agrícola. Sorprendentemente, el 76,8% de la población no tenía tanques de almacenamiento de agua, y el 23,2% no estaba seguro de la existencia de tales tanques en sus hogares. Entre aquellos que afirmaron tener tanques, se destacó que la mayoría no realizaba un mantenimiento periódico ni seguía prácticas adecuadas para su limpieza y conservación. Estos hallazgos resaltan la necesidad de una mayor educación y conciencia en la comunidad sobre el manejo y cuidado de los recursos hídricos.

- **Preguntas asociadas a condiciones de salud derivadas del consumo de agua subterránea**

Mediante la encuesta aplicada (Ver Anexo 1), se identificó que las personas del sector rural asocian enfermedades como el dolor de cabeza, alergias y dolores abdominales a condiciones de mala calidad del agua para consumo humano como se refleja en la Figura 11.

Figura 11. *Resultados problemas de salud asociados a la calidad del agua*



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la encuesta arrojaron datos interesantes en relación con la salud de la población encuestada. Un notable 52% de los participantes informaron haber experimentado dolores de cabeza, los cuales asociaron directamente con las condiciones de calidad del agua. Además, algunos manifestaron que también habían experimentado dolores abdominales y alergias que atribuyen a la misma causa. Estos hallazgos subrayan la preocupación y el impacto que la calidad del agua puede tener en la salud de la comunidad. Por otro lado, se observó que el 40% de los encuestados no había presentado ninguna enfermedad que pudiera ser relacionada con la calidad del agua que consumen. Estos datos ponen de relieve la variabilidad en las experiencias de salud dentro de la población y sugieren la importancia de una evaluación más detallada de los factores que pueden influir en la relación entre el agua y la salud.

Mediante la aplicación de la encuesta semiestructurada en la comunidad rural, se evidenció la percepción crítica de la comunidad con respecto a las condiciones de calidad del agua destinada al consumo humano. Los resultados revelaron deficiencias significativas en varios aspectos relacionados con la calidad del agua, con posibles consecuencias graves para la salud humana. Estas preocupaciones parecen estar vinculadas intrínsecamente a acciones antropogénicas, como la mala disposición de residuos sólidos, malas prácticas agrícolas con el uso excesivo de pesticidas en cultivos y construcciones inadecuadas sin licenciamientos adecuados en el área rural del municipio. Las observaciones de campo en fuentes

subterráneas locales (Pozo el Salvio, Cetime, la Moya y el Abra) proporcionaron evidencia concreta de actividades agrícolas en curso, destacando prácticas que implicaban el uso de fertilizantes y pesticidas, identificándose como un factor inminente de contaminación hídrica en la región.

Conforme con lo expuesto en la Tabla 6, se relacionan las valoraciones asignadas de acuerdo con la metodología de Videla & Schroh (2000) y el proceso del método Delphi , asignando una valoración pertinente de acuerdo con el criterio de tres (3) expertos y la obtención de información de datos reales de cada indicador específico. En esta tabla, se expusieron los indicadores genéricos y cada uno con sus respectivos indicadores específicos para así generar el proceso de ponderación y evaluación de esta metodología, entendiendo las letras de la siguiente manera: A: Alto impacto; M: medio impacto; B: bajo impacto. Estos primeros resultados permitieron identificar el impacto de estos indicadores establecidos según los criterios de: **V*alidez científica, Representativos, Medibles, Comprensión, Calidad, Accesibilidad, Especificidad y Aplicabilidad.***

6.2.2. Selección de indicadores socioambientales

Tabla 6. *Medición inicial por expertos de indicadores, metodología Videla y Schroh 2000.*

Indicadores genéricos	***Indicadores específicos***	***Criterios de evaluación para la selección de los indicadores***								
		Validez	**Representativo**	**Medibles**	**Comprensión**	**Confiabilidad**	**Accesibilidad**	**Especificidad**	**Aplicabilidad**	**Resultado**
Calidad de vida	Crecimiento poblacional	M	A	A	B	A	A	A	M	20
	Densidad poblacional	A	M	A	M	M	M	A	A	21
	Acceso a servicios básicos	B	M	A	M	M	B	B	B	13
	Centros de salud	M	A	M	M	M	A	A	M	19
Educación	Escolaridad	M	M	B	M	M	B	M	M	14
	Acceso a la educación	B	M	A	A	M	B	M	M	16
Residuos sólidos	Recolección de residuos	A	A	A	A	M	M	A	M	21
	Manejo de residuos	B	M	B	M	B	M	M	M	13
	Disposición final	A	A	B	A	M	B	M	M	17
	Actividades agrícolas	A	A	M	A	M	M	A	A	21
	Actividades ganaderas	A	M	M	A	M	M	A	A	20

Uso del suelo	Zonas urbanas/ asentamientos poblacionales	A	A	B	B	M	B	A	B	15
	Actividades industriales	A	A	M	A	A	A	B	A	21
Uso del recurso hídrico	Usos agrícolas	M	A	B	B	M	M	B	A	15
	Uso industrial	M	B	B	M	M	M	B	A	14
	Actividades de recreación	B	B	B	B	B	B	B	B	8
	Consumo humano y doméstico	A	A	M	A	M	M	A	M	22
Ingresos económicos	Sector primario	M	B	B	M	B	B	B	B	10
	Sector secundario	B	B	B	M	M	B	M	B	11
	Sector terciario	B	B	B	B	B	B	B	M	9
Conservación e investigación	Áreas de conservación	A	A	M	M	B	M	M	M	17
	Especies amenazadas	M	M	B	B	B	B	M	B	11
	Investigación del territorio	B	B	B	M	B	B	B	B	9

Nota: Las letras asignadas corresponden a lo siguiente: A (Alto impacto) M (Medio impacto) B (Bajo impacto), de igual manera, la asignación del puntaje y color se basada según lo propuesto por los autores de la metodología desarrollada descritos en la Tabla 4. Adaptado Calvopiña (2021)

Los resultados de la evaluación de los ocho (8) ítems propuestos (V*alidez científica, Representativos, Medibles, Comprensión, Calidad, Accesibilidad, Especificidad y Aplicabilidad)* , revelaron que ciertos indicadores genéricos con sus indicadores específicos se destacan por su significativo impacto en relación con las fuentes hídricas subterráneas. Entre estos, se destacan la ***calidad de vida*** con un impacto mayor teniendo indicadores específicos como: (*Crecimiento y densidad poblacional*) con 20 y 21 puntos respectivamente; y el indicador genérico ***uso del suelo*** con indicadores específicos (*actividades agrícolas y ganaderas)* con 21 y 20 puntos. Estos resultados obtenidos, junto con los datos recopilados en campo mediante la encuesta aplicada, evidenciaron en una primera parte una fuerte interconexión entre estos indicadores y las condiciones tales como deficiencias en el mantenimiento, cultivos agrícolas, empresas industriales cercanas a las fuentes subterráneas; de igual manera esta primera evaluación permitió identificar que estos indicadores seleccionados logren ser medibles.

Un hallazgo importante fue el determinar que varias de las condiciones mencionadas anteriormente, son de alto impacto paras las fuentes subterráneas, las cuales están relacionados con los usos de suelo en las zonas rurales, específicamente con malas prácticas a nivel agrícola. Esta relación ha exacerbado con relación al uso excesivo de pesticidas y fertilizantes, lo que plantea preocupaciones significativas en términos de contaminación hídrica. En cuanto a la selección de indicadores evidenciados en la Tabla 7., los expertos subrayaron la relevancia de los indicadores elegidos para evaluar el territorio y las condiciones específicas en torno a las fuentes hídricas subterráneas. No obstante, señalaron que aspectos fundamentales para la viabilidad de los indicadores. Es importante que los indicadores sean costo-eficientes, es decir, que exista una relación positiva entre el volumen de información requerida y el costo de recopilación esto tomado de otros estudios en las revisiones bibliográficas. Además, se destacó la importancia de la disponibilidad y accesibilidad de los datos. En ocasiones, la adquisición de datos puede ser complicada o incluso imposible, lo que puede afectar la calidad de los datos utilizados para calcular los indicadores propuestos. Este aspecto resalta la necesidad de considerar cuidadosamente la factibilidad práctica de obtener los datos necesarios para evaluar de manera efectiva las condiciones de las fuentes hídricas subterráneas, como lo señala Escobar (2006).

Finalmente se presenta los datos finales ponderados para la selección de los indicadores de impacto determinados y reflejados en la Tabla 7; en donde la calidad de vida es el indicador específico con mayor puntaje del 27,3%. No obstante, se presentan en la Tabla 8 y la Tabla 9 los datos de evaluación puntual determinados por las metodologías utilizadas en esta investigación.

Tabla 7. *Resultados evaluación y selección de indicadores genéricos método AHP*

Indicadores genéricos	**Ponderación final evaluación de matrices (%)**
Calidad de vida	27,3
Educación	18,3
Residuos sólidos	8,5
Uso del suelo	14
Uso del recurso hídrico	14
Ingresos económicos	12,2
Conservación e investigación	6

Fuente: Elaboración propia.

Según la Tabla 7, se identificó que el indicador genérico con mayor ponderación de impacto en el municipio de Cota Cundinamarca fue el de Calidad de vida con un 27,3%, seguido del indicador de educación con el 18,3%., residuos sólidos con el 8,5%, uso del suelo y uso del recurso hídrico con el 14%, ingresos económicos 12,2% y finalmente conservación e investigación del 6%. Dichos datos fueron obtenidos a partir de los procesos de matriz de pares de la metodología del proceso jerárquico (Ver Anexo 2). Para la ponderación obtenida anteriormente, se detalla en la Tabla 8 los resultados obtenidos para la valoración de los indicadores específicos, además de ello, se categorizan según los tipos de indicadores obtenidos de revisión bibliográfica materializados en datos porcentuales finales obtenidos del proceso metodológico jerárquico (Ver Anexo 3 al Anexo 9).

Tabla 8. *Resultados de evaluación de indicadores específicos método proceso análisis jerárquico (AHP)*

Tipo de indicador	Indicadores genéricos	Indicadores específicos	Descripción	Ponderación matriz (%)
Presión	Calidad de vida	Crecimiento poblacional	Describe el crecimiento del municipio en área rural, permite medir el aumento o disminución de la población de un territorio para un período determinado.	11,9
		Densidad poblacional	Describe qué tan poblado se encuentra el territorio rural a lo largo de la superficie del territorio.	9,33
		Acceso a servicios básicos	Describe la proporción de personas que viven en hogares que cuentan con energía eléctrica, agua potable, recolección de basura y alcantarillado.	3,51
		Centros de salud	Describe la presencia de centros de salud u hospitales en el interior o cercanos a la zona de estudio.	2,25
	Educación	Acceso a la educación	Describe sobre el porcentaje de población que ha asistido a centros de educación.	10,5
		Escolaridad	Describe el porcentaje de las personas que saben leer y escribir.	7,5
		Centros de educación	Describe la cantidad de centros de instrucción escolar por habitante.	7,5
	Residuos sólidos	Recolección de residuos	Se refiere al porcentaje de cobertura de la población a la que se recoge los residuos.	5,7
		Manejo de residuos	Se refiere a la existencia u ausencia de recolectores que clasifiquen o separen los residuos.	2,3
		Disposición final	Describe el tipo de disposición final que tienen los residuos del territorio.	1,0

	Uso del suelo	Actividades agrícolas	Describe el porcentaje de impacto dentro del perímetro cercano a las fuentes subterráneas.	4,7
		Actividades ganaderas	Describe el porcentaje de impacto dentro del perímetro cercano a las fuentes subterráneas.	3,3
		Zonas urbanas/ asentamientos poblacionales	Describe el porcentaje de construcción referente a edificaciones dentro de las áreas rurales del municipio.	1,9
		Actividades industriales	Describe el porcentaje de impacto dentro del perímetro cercano a las fuentes subterráneas.	4,0
	Uso del recurso hídrico	Usos agrícolas	Relacionado a la cantidad del recurso hídrico utilizado en actividades agrícolas en el área de estudio.	3,5
		Usos industriales	Relacionado a la cantidad del recurso hídrico utilizado en actividades industriales en el área de estudio	1,5
		Actividades de recreación	Relacionado a la cantidad del recurso hídrico utilizado en actividades recreativas.	0,8
		Consumo humano y doméstico	Relacionado a la cantidad del recurso hídrico utilizado en actividades recreativas y de uso doméstico y para consumo humano	8,2
Estado	Ingresos económicos	Sector primario	Proporciona datos acerca del porcentaje de la población involucrada en labores productivas relacionadas con la extracción y adquisición de materias primas.	1,7
		Sector secundario	Proporciona información acerca del porcentaje de la población que se emplea en actividades artesanales e industriales, donde se utilizan los recursos del sector primario para la creación de productos nuevos.	3,4
		Sector terciario	Proporciona información sobre el porcentaje de la población que se dedica a actividades	

			relacionadas con los servicios materiales no productivos de bienes	6,9
	Conservación e investigación	Áreas de conservación	Proporciona información del porcentaje de áreas de conservación que se hallan dentro del área de estudio.	3,8
		Especies amenazadas	Proporciona información del porcentaje del número de especies que se encuentran amenazadas dentro del área de estudio.	1,6
		Investigación científica en el territorio	Proporciona la información si en el territorio investigación científica o programas de investigación.	0,6

Nota: Los datos resaltados representan los indicadores específicos de mayor impacto en el área de estudio. Adaptada Calvopiña (2021)

Conforme con los resultados obtenidos en la Tabla 8, y lograr comprender la descripción de los datos obtenidos para la ponderación y evaluación de los indicadores específicos, se evidencia en la Tabla 9 los resultados obtenidos a partir de los datos del área de estudio adquiridos de información recopilada de las entidades del municipio de Cota categorizados en rangos propuestos por Calvopiña, (2021) y sus ponderaciones finales de los procesos de valoración de matrices del proceso del análisis jerárquico.

Tabla 9. *Resultados de rangos de medición de los indicadores con mayor impacto en el territorio.*

Indicadores genéricos	**Indicadores específicos**	**Ponderación final**	**Rangos generales propuestos por Calvopiña 2021**	**Datos del área de estudio**
Calidad de vida	Crecimiento poblacional	11,9	Mayor del 2%	1,83%
			Entre 1,5 y el 2%	
			Entre 1% y 1,49%	
			Entre 0,5% y 0,99%	
			Menor del 0,5%	
	Densidad poblacional	9,33	Mayor de 70 hab/ha	

			Entre 60-69 hab/ha	45 hab/ha
			Entre 40-59 hab/ ha	
			Entre 10-39 hab/ha	
			Menor de 10 hab/km^2	
	Acceso a servicios básicos	3,51	Mayor 80%	84%
			Entre 60%- 79,9%	
			Entre 40% -59,9%	
			Entre 20% - 39,9%	
			Menor 20%	
	Centros de salud	2,25	Menor a 5000 hab. x centro médico	678,3 hab x centro médico
			Entre 5001 y 10000 hab. x centro médico	
			Entre 10001 y 15000 hab. x centro médico	
			Entre 15001 y 20000 hab. x centro médico	
			Mayor al 20000 hab. x centro médico	
Educación	Acceso a la educación	10,5	Menos del 20% de la población tiene acceso.	94,5%
			Entre el 40% - 20,1% de la población tiene acceso	
			Entre el 60% - 40,1% de la población tiene acceso	
			Entre el 80% - 60,1% de la población tiene acceso	
			Más del 80% de la población tiene acceso	
			Menos del 20% de la población ha asistido	

	Escolaridad	7,5	Entre el 40% - 20,1% de la población ha asistido	37%
			Entre el 60% - 40,1% de la población ha asistido	
			Entre el 80% - 60,1% de la población ha asistido	
	Centros de educación	7,5		77,2 %
			Entre el 60% - 40,1% de la población tiene acceso	
			Entre el 80% - 60,1% de la población tiene acceso	
			Más del 80% de la población tiene acceso	
Residuos sólidos	Recolección de residuos	5,7	Menor a 20% de Habitantes	95,3%
			Entre 21%-40% de Habitantes	
			Entre 41%-60% de Habitantes	
			Entre 61%-80% de Habitantes	
			Mayor al 81% de la población total	
	Manejo de residuos	2,3	Inexistente	Bueno
			Malo	
			Bueno	
			Excelente	
	Disposición Final	1,0	Quema de basuras	Relleno sanitario
			Celdas	
			Botadero	
			Relleno sanitario	
Uso del suelo	Actividades agrícolas	4,7	Más al 46% del territorio	71,3%
			Entre 36% - 45% del territorio	
			Entre 26% - 35% del territorio	
			Entre 16% - 25% del territorio	
			Menos del 15% del territorio	

	Actividades ganaderas	3,3	Más al 46% del territorio	
			Entre 36% - 45% del territorio	23,6%
			Entre 26% - 35% del territorio	
			Entre 16% - 25% del territorio	
			Menos del 15% del territorio	
	Zonas urbanas/ asentamientos poblacionales	1,9	Más del 65% del área total del territorio	37,9%
			Entre 51% - 64,9% del área total del territorio	
			Entre 34% - 50,9% del área total del territorio	
			Entre 18% - 33,9% del área total del territorio	
			Menos del 17% del área total del territorio	
	Actividades industriales	4,0	Más del 20% del territorio	57,8%
			Entre 16% - 19,9% del territorio	
			Entre 11% - 15,5% del territorio	
			Entre 6% - 10,9% del territorio	
			Menos del 6% del territorio	
Uso del recurso hídrico	Actividades agrícolas	3,5	Mayor o igual a 30%	52,4%
			Entre 24 - 29%	
			Entre 18 – 23%	
			Entre 12 – 17%	
			Menor o igual a 11%	
	Actividades industriales	1,5	Mayor o igual al 8%	12,5%
			Entre 6 - 7%	
			Entre 4 - 5%	
			Menor o igual a 1%	
	Actividades ocasionales y lúdicas	0,8	Mayor o igual a 0,04%	0,023%
			Entre 0,03 – 0,035%	
			Entre 0,02 – 0,025%	

			Entre 0,01 – 0,015%	
			Menor o igual a 0,05%	
	Consumo humano y domestico	8,2	Mayor o igual a 30%	68,1%
			Entre 24 - 29%	
			Entre 18 – 23%	
			Entre 12 – 17%	
			Menor o igual a 11%	
Ingresos económicos			Más del 18,74% de la población	
	Sector primario	1,7	Entre 14,06% - 18,73% de la población	4,5%
			Entre 9,38% - 14,05% de la población	
			Entre 4,7% - 9,37% de la población	
	Sector secundario	3,4	Más del 12% de la población	
			Entre 9% - 11,9% de la población	
			Entre 6% - 8,9% de la población	
			Entre 3% - 5,9% de la población	
			Menos del 2% de la población	
	Sector terciario	6,9	Más del 65 % de la población	
			Entre 49% - 64,9% de la población	52,7%
			Entre 32% - 48,9% de la población	
			Entre 16% - 31,9% de la población	
			Menos del 15% de la población	
Conservación e investigación	Áreas de conservación	3,8	Menos del 3% del territorio	12,5%
			Entre 4% - 8,9% del territorio	
			Entre 9% - 13,9% del territorio	
			Entre 14% - 18,9% del territorio	
			Más del 19% del territorio	
	Especies amenazadas	1,6	Significativo número de especies amenazadas	Bajo número de especies
			Moderado número de especies amenazadas	
			Bajo número de especies amenazadas	

			Muy bajo número de especies amenazadas	
			Ninguna especie amenazada	
	Investigación científica en el territorio	0,6	Ninguna publicación realizada	Ninguna publicación realizada
			Algunos artículos en revistas nacionales	
			Algunos artículos en revistas internacionales y numerosos en revistas nacionales	
			Numerosos artículos en revistas internacionales y nacionales	

Nota: Adaptada Calvopiña (2021).

De acuerdo con los resultados obtenidos en la metodología desarrollada por Videla y Schroh, como se mostró en la Tabla 6 y en línea con lo explicado en la metodología basada en el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) evidenciado en las Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9, se observó claramente que ciertos indicadores demostraron una mayor incidencia y un impacto significativo en esta investigación. En particular, se destacaron los indicadores genéricos de calidad de vida, educación, uso del suelo y uso hídrico**,** como se detalla en la Tabla 10. Entre estos indicadores, se identificaron indicadores específicos clave que ejercen un impacto sustancial, como ***el crecimiento poblacional, el acceso a la educación, el uso del suelo agrícola e industrial, y el uso hídrico para consumo humano***.

Es relevante subrayar que la aplicación de estas metodologías en la investigación se llevó a cabo de manera precisa y efectiva, gracias a la colaboración de un equipo interdisciplinario de expertos dedicados a cuestiones ambientales en el municipio de Cota. Estos expertos demostraron un compromiso y un interés significativos al analizar y determinar de manera ponderada, la importancia y selección adecuada de los indicadores en estudio. Las metodologías utilizadas facilitaron la creación de consensos a través de matrices en un proceso que involucró la organización municipal y que permitió abordar el impacto significativo que está afectando a las fuentes hídricas subterráneas. Este enfoque colaborativo se traducirá en la promoción y formulación de estrategias sólidas para abordar los desafíos territoriales en cuestión.

Los indicadores genéricos de Calidad de vida, educación, residuos sólidos, uso del suelo, uso del recurso hídrico, ingresos económicos, conservación e investigación, son los seleccionados de manera ponderable con sus variables respectivas lo que permitió el desarrollo del índice socioambiental para la medición de la calidad del agua en las áreas rurales del municipio de Cota (Ver Ecuación 7). Lo anterior, está relacionado con lo propuesto por Sachs (2007) y dice que el desarrollo sustentable debe enfatizar, además de la problemática económica y social, en cuestiones ambientales. Esto significa, por ejemplo, que la elevación de calidad de vida y la equidad social deben ser objetivos centrales (propósito final) del modelo de desarrollo. De la misma manera, la eficiencia y el crecimiento

económico son esenciales, pues se hace improbable aumentar la calidad de vida con equidad; en la ausencia de condiciones ambientales adecuadas, no es posible asegurar la calidad de vida y la equidad social a las generaciones futuras. Gallopín (1982) completa enfatizando que las condiciones ambientales se relacionan íntimamente a la calidad de vida, pues ésta es vista como resultante de la salud de la persona y de su sentimiento de satisfacción.

En consonancia con el marco conceptual presentado en esta investigación, ninguno de los expertos mencionó indicadores vinculados a los aspectos de aire, transporte o alimentación. Esto podría interpretarse como una falta de experiencia de los encuestados en estos temas o una relación conceptual limitada con la categoría socioambiental. Como Cabero e Infante (2014) han señalado, una de las limitaciones inherentes al método de criterio de experto es la dificultad de evaluar el nivel de experiencia de los expertos, así como la influencia que podrían ejercer sobre eventos imprevistos, lo que podría introducir sesgos en las respuestas.

El resultado final de este proceso de evaluación y normalización es una ponderación definitiva para cada indicador, que proporciona una base sólida para la toma de decisiones en el contexto de la investigación. Estas ponderaciones permitieron priorizar y asignar ponderaciones, contribuyendo así a la formulación de estrategias y políticas basadas en datos sólidos y objetivos materializados en el índice socioambiental propuesto en la Ecuación 6. Además, las metodologías propuestas en esta investigación permitieron reforzar la robustez y la transparencia del proceso de toma de decisiones en la investigación, lo que es fundamental para obtener resultados confiables y respaldados por un enfoque científico riguroso.

Finalmente, en la Tabla 10 se presentan un total de cinco (5) indicadores socioambientales, los cuales están asociados a los de mayor impacto en el área rural los cuales fueron incorporados para la construcción del índice socioambiental de calidad del agua (ISCAFS).

Tabla 10. *Indicadores socioambientales seleccionados a utilizar en el índice (ISCAFS)*

Indicador genérico	***Indicador específico seleccionado***	***Porcentaje de impacto (%)***
Calidad de vida	Crecimiento poblacional	11,9
Educación	Acceso a la educación	10,5
Uso del recurso hídrico	Consumo humano y doméstico	8,2
Ingresos económicos	Sector terciario	6,9
Residuos sólidos	Recolección de residuos	5,7

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos los indicadores a implementar para la generación del índice socioambiental, se concuerda con la investigación realizada por Leinfelder et al., (2019) debido a que con los resultados obtenidos demuestran que las fuentes hídricas subterráneas son muy diversas en términos de sus indicadores a seleccionar provocando que la gestión para el diseño de un índice de medición sea un desafío al momento de mantener un equilibrio entre los problemas intrínsecos del territorio, siendo el porcentaje de impacto el valor central para la elección de los mismos.

De igual manera, fue importante tener en cuenta que la determinación de la calidad de un cuerpo de agua usualmente conlleva el análisis de una cantidad grande de indicadores, los cuales se expresan en diferentes magnitudes y unidades, que difieren entre sí y con diferente comportamiento, en términos de su relación concentración-impacto (Abassi, 2009). La importancia de obtener una selección de los indicadores se debe a que estos son datos estadísticos o mediciones de una cierta condición, cambio de la calidad o del estado de lo que se evalúa, por ello su integración de forma que generan un solo valor, se les denomina índices (FAO, 2001). Por tanto, la construcción del índice socioambiental de medición de calidad del agua para consumo humano está diseñado para sintetizar una gran cantidad de información de muchas variables o indicadores. Esa facultad de los índices de cuantificar, simplificar una cantidad grande de datos a un solo valor y comunicar información compleja, es lo que los ha

hecho un medio efectivo para transmitir una información puntual. Para que un índice sea práctico, debe de reducir una cantidad grande de indicadores a una forma más simple, proceso en el cual se estableció la metodología diseñada para esta investigación, sin embargo, un buen diseño del índice conlleva a que el valor suministrado por el índice sea representativo de la calidad del agua y de su tendencia (León, 1992).

6.2.3. Propuesta del índice socioambiental de la calidad del agua en fuentes subterráneas de las áreas rurales (ISCAFS)

Para la propuesta del índice socioambiental (ISCAFS) de la presente investigación, fue adaptada desde lo propuesto por Canadian Council of Ministers of the Environment, conocido como CCME_WQI (por sus siglas en inglés), lo que a su vez permitió incorporar los indicadores socioambientales, dado a que este fue desarrollado para simplificar el reporte de los datos de calidad del agua para consumo humano, siendo así una herramienta para generar resúmenes de los datos de calidad útiles tanto para técnicos como como para el público en general interesado en ese conocimiento (CCME, 2001).

A continuación, se presenta el índice socioambiental propuesto (ISCAFS) por sus siglas, (Ecuación 7). Este tipo de ecuación propuesta permitió un proceso de la incorporación de los indicadores socioambientales acorde con la metodología aplicada para su selección de manera sencilla; de acuerdo con lo anterior, a nivel literario la generación de la mayoría de índices antes de pasar a las fórmulas casi todos los autores consideran que unos parámetros son más importantes que otros, y por lo tanto se les asigna un peso relativo a cada variable (Del Río, 1986), que para el caso de esta investigación los indicadores seleccionados permitieron la facilidad para su incorporación. Finalmente, el valor obtenido mediante la ecuación generada de agregación de los indicadores debe ser interpretado mediante una escala general de calidad o polución, para lo cual los diferentes autores toman una escala de 0 a 10 ó 0 a 100, define rangos de calidad (Samboni et. al, 2007).

Ecuación 7. Índice socioambiental de calidad del agua para fuentes hídricas subterráneas (ISCAFS)

$$\text{ISCAFS} = 100 - \left[\left\{\frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2)}}{1732}\right\} - \{CP + AE + CH + ST + RS\}\right]$$

Fuente: Adaptada de Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME, 2001).

Dónde,

F1 (Alcance): representa el porcentaje de parámetros que no cumplen con lo normado, al menos una vez en el periodo que se analiza, con respecto al número total de parámetros que se escogieron (Rojas et. al, 2008)

$$F1 = \frac{Parámetros\ fuera\ del\ valor\ normado}{Total\ de\ parámetros} * 100$$

F2 (Frecuencia): representa el porcentaje de ensayos individuales que dieron resultados diferentes a lo normado el total de ensayos que se realizaron. Con ensayos se refiere a análisis de laboratorio que se realizan para cada parámetro. (Rojas et. al, 2008)

$$F2 = \frac{Ensayos\ fuera\ del\ valor\ normado}{Total\ de\ ensayos} * 100$$

F3 (Amplitud)*:* representa cuan diferente dio el resultado del ensayo con respecto al valor establecido. Este factor se calculó teniendo en cuenta los siguientes tres (3) pasos:

a. El número de veces por el cual, cada valor fallido es mayor (o menor, en el caso de que lo normado sea un valor mínimo) que el valor establecido se denomina “excursión”. En el caso de que el

valor calculado no deba exceder lo normado se calcula de la siguiente forma:

$$Excursión\ i = \left(\frac{Valor\ fuera\ del\ valor\ normado}{Valor\ normado}\right) - 1$$

b. En el caso que el valor calculado no deba ser menor que lo normado se calcula de la siguiente forma:

$$Excursión\ i = \left(\frac{Valor\ normado}{Valor\ fuera\ del\ valor\ normado}\right) - 1$$

c. A continuación, se calculó la suma normalizada de las excursiones (nse, siglas en inglés), dividiendo la sumatoria de las excursiones entre el total de ensayos realizados (tanto los que dieron valores que no cumplen con lo normado como aquellos que si cumplen):

$$nse = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} Excursión\ i}{Total\ de\ ensayos}\right)$$

d. Finalmente, el factor F3 se calculó mediante la formula siguiente:

$$F3 = \left(\frac{nse}{0.01\ nse + 0.01}\right)$$

Una vez que se establecieron y obtuvieron los tres factores, se calcula, sumándose los tres valores. La suma de los cuadrados de cada factor es igual al cuadrado del índice. Esta aproximación trata al índice como un espacio tridimensional donde los factores se colocan a lo largo de cada eje (x, y, z); esto permitirá al índice cambiar de manera directamente proporcional con los cambios que se buscan en los valores de los factores. (Hidalgo & Espinosa, 2014).

Por otro lado, los indicadores socioambientales estarán representados de la siguiente manera, en donde, los valores porcentuales fueron determinados bajo la metodología indicadores específicos en el método proceso análisis jerárquico (AHP) relacionados en la Tabla 8 y la Tabla 10, los cuales se describen a continuación:

CP: Porcentaje de impacto indicador crecimiento poblacional en el área rural (11,9 %)
AE: Porcentaje de impacto indicador acceso a la educación en el área rural (10,5%)
CH: Porcentaje de impacto indicador uso del agua para consumo humano (8,2%)
ST: Porcentaje de impacto indicador sector económico terciario en el área rural. (6,9%)
RS: Porcentaje de impacto indicador recolección de residuos sólidos en el área rural (5,7%)

Los porcentajes relacionados anteriormente fueron obtenidos como resultado de la selección final evaluada de los indicadores con mayor impacto en el área rural del municipio de Cota, generando un porcentaje total del (42,7%), esto permitió que las fórmulas de agregación de indicadores o de subíndices no conllevaran términos o factores negativos ; dejando claro que para esta investigación se quiso obtener aquellos que generaran el mayor impacto asociado al comportamiento de las fuentes subterráneas hídricas de abastecimiento para consumo humano en las áreas rurales del municipio de Cota. De acuerdo con Ott (1978), las funciones matemáticas para realizar este proceso pueden ser: lineales, lineales segmentadas (incluyen funciones de umbral), no lineal y segmentada no lineal. Según lo propuesto al estudio realizado por House (1989), los métodos utilizados para el cálculo de un índice de calidad del agua, el promedio aritmético ponderado modificado y la suma ponderada modificada proveen los mejores resultados para la indexación de la calidad general del agua (Samboni et. al, 2007). De igual manera, se tuvo en cuenta que la cantidad de indicadores que conforman un índice nuevo debe reducirse al máximo permisible y debe estar compuesto por aquellos que expliquen la calidad de las aguas en grado significativo (Abassi, 2009; León, 1992). Usualmente constan de unos 5-10 indicadores y su naturaleza puede variar entre un índice de calidad del agua a otro. Asimismo, se debe evitar el uso de indicadores que son redundantes entre sí, así como la existencia de covarianza entre los mismos (León, 1992).

Es importante mencionar que a partir de lo ejecutado para el planteamiento de este índice se contó con referentes, tal como lo propuesto por Tobin et. al, (2007), los cuales hicieron una adaptación del índice canadiense para zonas forestales, encontrando que el alcance, la frecuencia y la amplitud varían significativamente entre estaciones del año; y lo propuesto por Terrado et al. (2010), emplearon el CCME_WQI (por sus siglas en inglés), por su flexibilidad para la selección de parámetros, así como por la posibilidad que brinda en la modificación de los requisitos que debe reunir cada variable en dependencia del uso del agua, Guzmán et. al, (2011) y Mohebbi et. al. (2013), emplearon el CCME_WQI para valorar aguas para riego y para consumo humano respectivamente, si bien en ambos casos el índice fue modificado y calcularon subíndices por grupos de parámetros relacionados, que luego permitieron calcular una valoración global y de esta forma, es posible determinar y comunicar más fácilmente qué variables son las que más influyen en la calidad del agua. Estas fueron consideraciones tomadas en cuenta al generar una comparación y contraste a los requisitos y aspectos frente a la generación de índices de la calidad del agua propuestos por diversos autores.

Por otra parte, el resultado del índice se llevó a una escala adimensional entre 0 y 100, en donde el 0 indica pésima calidad de agua, y el 100 calidad de agua óptima. Se presenta la clasificación asignada en cinco (5) categorías para los resultados obtenidos del índice socioambiental de calidad del agua en las fuentes hídricas subterráneas (ISCAFS); esto teniendo cuenta lo propuesto por Minae (2007) en donde la calidad, en términos de estos indicadores, se pondera con una puntuación la cual es el resultado de sumar el puntaje individual de cada indicador evaluado.

Finalmente, en la Tabla 11 se presenta la propuesta de la escala de clasificación a emplear para establecer la calidad del agua, la cual está basada en los estándares de calidad de agua establecidos por la EPA La Agencia de Protección Ambiental, (en inglés: United States Environmental Protection Agency; acrónimo: EPA) en los Estándares Nacionales Primarios para Agua Potable (NPDWS, 2003). De igual manera, de acuerdo con lo propuesto por Vega (2009), se consideró un valor mínimo que puede tener una fuente hídrica antes de

considerarse en estado de calidad muy crítica usando las concentraciones de los estándares de calidad considerando el 13%, desarrollando así una nueva escala de clasificación.

Tabla 11. *Escala de clasificación índice socioambiental de la calidad del agua de fuentes subterráneas para áreas rurales del municipio de Cota (ISCAFS)*

Rango	**Clase**	**Clasificación calidad del agua para consumo humano**	**Descripción**	**Color**
91-100	Clase 1	Excelente	Sin contaminación	Azul
71-89	Clase 2	Buena	Contaminación incipiente	Verde
31-70	Clase 3	Regular	Contaminación moderada	Amarillo
15-30	Clase 4	Crítica	Contaminación severa	Naranja
0-15	Clase 5	Muy crítica	Contaminación muy severa	Rojo

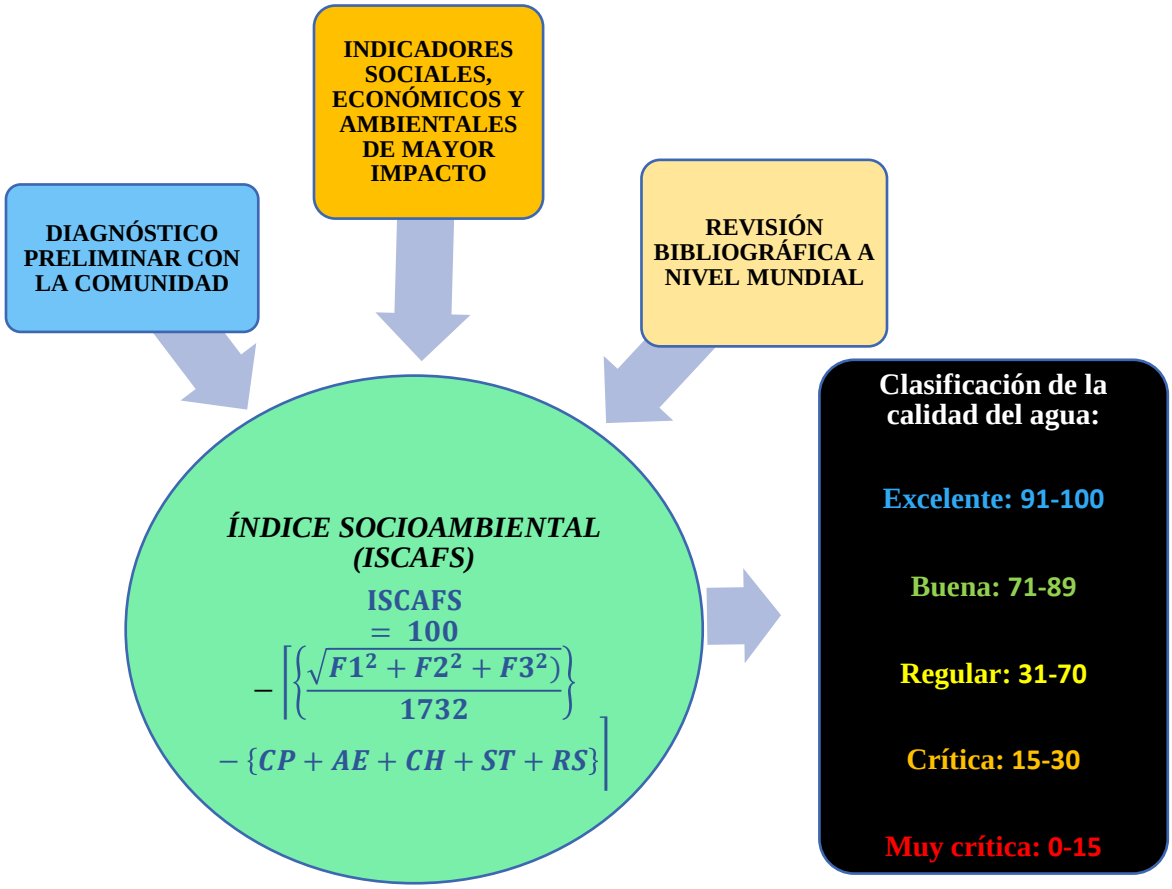
Fuente: Elaboración propia.

Es importante indicar que las ecuaciones o fórmulas de cálculo propuestas por distintos autores, provocan comportamientos diferentes en los criterios con relación a la concentración del indicador. Estas diferencias se ven reflejadas en la sensibilidad del cálculo del índice, al clasificar la calidad del agua, dando como resultado valores que no corresponden a la realidad. De ahí la importancia de llevar a cabo un estudio exhaustivo de las distintas propuestas, para seleccionar aquel tipo de cálculo que se ajuste de la mejor forma posible a la zona en estudio, sus características particulares del entorno socio ambiental y a un uso particular del agua, además de la normativa existente en la región, relacionada a indicadores de calidad del agua (Brenes, 2013).

Por otra parte, es importante saber que la determinación de la calidad de un cuerpo de agua usualmente conlleva el análisis de una cantidad grande de indicadores. Estos se expresan en diferentes magnitudes y unidades, que difieren entre sí y con diferente comportamiento, en términos de su relación concentración-impacto (Abassi, 2009), es por

ello por lo que para esta investigación se evidenció la importancia de asociar e incorporar aquellos que fueran los de mayor impacto para el área de estudio. En la Figura 14, se estableció los componentes principales para la construcción generada para la propuesta del índice.

Figura 12. Propuesta índice socioambiental de la calidad del agua para consumo humano ISCAFS



Fuente: Elaboración propia.

6.3. Validar el índice socioambiental propuesto a través de diferentes análisis y evidenciar su suficiencia y posible comportamiento en las fuentes subterráneas del área rural del municipio de Cota.

6.3.1. Aplicación prueba piloto del índice socioambiental en las fuentes subterráneas del área rural.

El resultado de los muestreos obtenidos para cada una de las fuentes hídricas subterráneas (el Abra, Salvio, la Moya y Cetime), se indican en las Tablas 12, 13, 14 y Tabla 15 respectivamente, donde se indica que existen parámetros como el pH, turbiedad, color aparente, hierro, aluminio, nitratos, carbono orgánico total (COT) y níquel, con valores que se encontraban en un rango mínimo o superior al soportado por la normativa (Resolución 2115 de 2007, expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Protección Social, Colombia); estos a su vez reflejaron valores característicos de aguas subterráneas con un mayor deterioro en su calidad, asociados principalmente con incremento en las actividades agrícolas e industriales (Torres et. al, 2010).

Para la aplicabilidad del índice (ISCAFS) se ejecutaron tomas de muestras para análisis de 34 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos dado a que dichos parámetros deben tener una relación con aspectos de la salud, así como aspectos físicos y químicos, que afecten la calidad del agua. (Cude, 2001; de Armas et al, 1992; León, 1992; González et al, 2013; Torres et al, 2009; Patiño et al, 2013). Se emplearon tres (3) ensayos o muestreos tomados en diferentes periodos (febrero, junio y septiembre) en el año 2023. De acuerdo con el Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME, 2001), es necesario utilizar al menos dos fechas de muestreo dentro de un mismo período para calcular el índice de calidad del agua.

Se evidenció que parámetros como turbiedad, hierro, y color aparente, constantemente se encuentran fueran dentro de los valores aceptados normativamente, dentro de los tres (3) ensayos ejecutados. Por otra parte, se evidencian parámetros en la fuente subterránea del Abra, con parámetros de cadmio (Cd) y arsénico (As), con uno de los ensayos fuera del rango normativo. Se menciona que el cadmio tiene como fuentes naturales actividad volcánica, los

incendios forestales y el transporte por el viento de partículas del suelo (Filipič, 2012), las fuentes antrópicas, el uso de fertilizantes fosfatados, la quema de combustibles fósiles, entre otros (Pernía et al., 2008). Es importante monitorear las concentraciones de Cd, puesto que afecta los riñones, pulmones, esqueleto y sistema nervioso central, generando hipocalcemia, diabetes, osteoporosis y cáncer (Burger, 2008 y Clemens et al., 2013). De igual manera, La exposición prolongada al arsénico, a través del consumo de agua contaminada puede causar cáncer y lesiones cutáneas. También se ha asociado a problemas de desarrollo, enfermedades cardiovasculares, neurotoxicidad y diabetes (OMS, 2011). En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de calidad del agua tomadas en campo.

Tabla 12. *Resultados de mediciones obtenidas fuente hídrica subterránea el Abra*

			Fuente hídrica subterránea el Abra			
No.	**Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos**	**Unidades**	**Ensayo 1**	**Ensayo 2**	**Ensayo 3**	**Valor normado (Res.2115 /2007)**
1	Conductividad	µs/cm	115,00	110,00	120,00	1000
2	pH	Unidades de pH	6,8	5,9	7,00	6,5-9,0
3	Turbiedad	UNT	24,6	23,2	22,81	2
4	Color aparente	UPC	165,4	178,0	173,90	15
5	Fluoruros	mg/L	0,13	0,2	0,18	1,0
6	Calcio	mg Ca/L	<5,00	<5,00	19,24	60
7	Alcalinidad	mg $CaCO_3$/L	63,0	68,0	66,78	200
8	Cloruros	mg Cl-/L	<5,0	<5,0	<5,0	250
9	Aluminio	mg / Al L	<0,100	<0,100	0,15	0,2
10	Dureza total	mg $CaCO_3$/L	45,9	58	56,05	300
11	Hierro	mg Fe/L	1,26	2,03	3,06	0,3
12	Magnesio	mg Mg/L	<5,00	<5,00	<5,00	36
13	Coliformes totales (NMP)	NMP/100 ml	<1	<1	<1	Ausencia en 100 cm^3

14	Coliformes Termotolerantes (NMP)	NMP/100 ml	<1	<1	<1	Ausencia en 100 cm^3
15	Nitratos	mg NO_3-/	12,3	22,1	21,40	10
16	Nitritos	mg NO_2-/L	0,00500	0,00500	<0,004	0,1
17	Sulfatos	mg SO_4 2-/L	<10,0	<10,0	<10,0	250
18	Olor y Sabor	Aceptable/ No Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
19	Antimonio	mg Sb/L	<0,02	<0,02	0,035	0,02
20	Arsénico	mg As/L	0,04	0,04	0,01	0,01
21	Bario	mg Ba/L	0,061	0,061	0,031	0,7
22	Cadmio	mg Cd/L	0,0045	<0,001	<0,001	0,003
23	Cobre	mg Cu/L	0,001	0,010	<0,005	1,0
24	Cromo	mg Cr/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,05
25	Mercurio	mg Hg/L	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
26	Níquel	mg Ni/L	0,007	0,007	0,013	0,02
27	Plomo	mg Pb/L	<0,010	<0,010	0,055	0,01
28	Selenio	mg Se/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,01
29	COT	mg COT/L	8,2	6,65	7,90	5,0
30	Manganeso	mg Mn/L	<0,1	0,152	<0,1	0,1
31	Molibdeno	mg Mo/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,07
32	Zinc	mg Zn/L	0,024	0,013	0,063	3
33	Cryptosporidium	ooquistes/L	<0,1	<0,1	<0,1	(0) Ooquistes
34	Giardia	quistes/L	<0,1	<0,1	<0,1	(0) Quistes

Nota: Los parámetros resaltados se refieren a aquellos que no cumplen con el valor normado. Los ensayos 1,2 y 3 corresponden a los periodos de febrero, junio y septiembre del año 2023 con fines de aplicabilidad del índice ISCAFS.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. *Resultados de mediciones obtenidas fuente hídrica subterránea el Salvio*

	Fuente hídrica subterránea el Salvio					
No.	**Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos**	**Unidades**	**Ensayo 1**	**Ensayo 2**	**Ensayo 3**	**Valor normado (Res.2115/2007)**

1	Conductividad	µs/cm	169,00	220,00	180,00	1000
2	pH	Unidades de pH	7,1	6,3	7,20	6,5-9,0
3	Turbiedad	UNT	12,4	10,1	3,73	2
4	Color aparente	UPC	76,0	66,0	22,11	15
5	Fluoruros	mg/L	0,22	0,22	0,22	1,0
6	Calcio	mg Ca/L	<5,0	<5,0	14,43	60
7	Alcalinidad	mg $CaCO_3$/L	124,9	119	73,05	200
8	Cloruros	mg Cl-/L	2,8	17	5,14	250
9	Aluminio	mg / Al L	<0,100	<0,100	0,26	0,2
10	Dureza total	mg $CaCO_3$/L	56,9	44	46,04	300
11	Hierro	mg Fe/L	1,2	2,58	1,19	0,3
12	Magnesio	mg Mg/L	<5,0	<5,0	<5,00	36
13	Coliformes totales (NMP)	NMP/100 ml	<0,1	<0,1	<0,1	Ausencia en 100 cm^3
14	Coliformes Termotolerantes (NMP)	NMP/100 ml	<0,1	<0,1	<0,1	Ausencia en 100 cm^3
15	Nitratos	mg NO_3-/L	1,6	12,6	11,03	10
16	Nitritos	mg NO_2-/L	<0,004	0,0240	<0,004	0,1
17	Sulfatos	mg SO_4 2-/L	<10,0	<10,0	<10,0	250
18	Olor y Sabor	Aceptable /No Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
19	Antimonio	mg Sb/L	<0,02	<0,02	<0,02	0,02
20	Arsénico	mg As/L	0,001	0,002	<0,001	0,01
21	Bario	mg Ba/L	0,067	0,089	0,047	0,7
22	Cadmio	mg Cd/L	<0,001	<0,001	<0,001	0,003
23	Cobre	mg Cu/L	0,006	0,006	<0,005	1,0
24	Cromo	mg Cr/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,05
25	Mercurio	mg Hg/L	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
26	Níquel	mg Ni/L	0,021	0,007	0,031	0,02
27	Plomo	mg Pb/L	<0,010	<0,010	0,05	0,01
28	Selenio	mg Se/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,01
29	COT	mg COT/L	2,9	7,42	8,24	5,0

30	Manganeso	mg Mn/L	<0,1	0,070	<0,1	0,1
31	Molibdeno	mg Mo/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,07
32	Zinc	mg Zn/L	0,030	0,026	0,067	3
33	Cryptosporidium	ooquistes/ L	<0,1	<0,1	<0,1	(0) Ooquistes
34	Giardia	quistes/L	<0,1	<0,1	<0,1	(0) Quistes

Nota: Los parámetros resaltados se refieren a aquellos que no cumplen con el valor normado. Los ensayos 1,2 y 3 corresponden a los periodos de febrero, junio y septiembre del año 2023 con fines de aplicabilidad del índice ISCAFS.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. *Resultados de mediciones obtenidas fuente hídrica subterránea la Moya*

Fuente hídrica subterránea la Moya						
No.	**Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos**	**Unidades**	**Ensayo 1**	**Ensayo 2**	**Ensayo 3**	**Valor normado (Res.2115/2007)**
1	Conductividad	µs/cm	150,00	120,00	170,00	1000
2	pH	Unidades de pH	6,70	5,7	6,90	6,5-9,0
3	Turbiedad	UNT	17,5	13,3	3,94	2
4	Color aparente	UPC	79,36	84,0	24,22	15
5	Fluoruros	mg/L	0,1	0,1	0,28	1,0
6	Calcio	mg Ca/L	<5,00	<5,00	16,03	60
7	Alcalinidad	mg $CaCO_3$/L	89,2	119	61,57	200
8	Cloruros	mg Cl-/L	<5,0	<5,0	<5,0	250
9	Aluminio	mg / Al L	<0,100	<0,100	0,18	0,2
10	Dureza total	mg $CaCO_3$/L	52,5	61	42,44	300
11	Hierro	mg Fe/L	1,34	1,46	1,18	0,3
12	Magnesio	mg Mg/L	<5,00	<5,00	<5,00	36
13	Coliformes totales (NMP)	NMP/100 ml	<1	<1	12,20	Ausencia en 100 cm^3
14	Coliformes Termotolerantes (NMP)	NMP/100 ml	<1	<1	<1	Ausencia en 100 cm^3

15	Nitratos	mg NO_3-/	<0,500	<0,500	23,70	10
16	Nitritos	mg NO_2-/L	0,0120	0,0120	<0,004	0,1
17	Sulfatos	mg SO_4 2-/L	<10,0	<10,0	<10,0	250
18	Olor y Sabor	Aceptable/No Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
19	Antimonio	mg Sb/L	<0,02	<0,02	<0,02	0,02
20	Arsénico	mg As/L	0,002	<0,001	0,002	0,01
21	Bario	mg Ba/L	0,010	0,109	0,035	0,7
22	Cadmio	mg Cd/L	<0,001	<0,001	<0,001	0,003
23	Cobre	mg Cu/L	<0,005	0,006	<0,005	1,0
24	Cromo	mg Cr/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,05
25	Mercurio	mg Hg/L	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
26	Níquel	mg Ni/L	0,003	0,005	0,022	0,02
27	Plomo	mg Pb/L	<0,010	<0,010	0,058	0,01
28	Selenio	mg Se/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,01
29	COT	mg COT/L	1,23	1,96	4,33	5,0
30	Manganeso	mg Mn/L	<0,1	0,035	<0,1	0,1
31	Molibdeno	mg Mo/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,07
32	Zinc	mg Zn/L	0,001	0,016	0,06	3
33	Cryptosporidium	ooquistes/L	<0,1	<0,1	<0,1	(0) Ooquistes
34	Giardia	quistes/L	<0,1	<0,1	<0,1	(0) Quistes

Nota: Los parámetros resaltados se refieren a aquellos que no cumplen con el valor normado. Los ensayos 1,2 y 3 corresponden a los periodos de febrero, junio y septiembre del año 2023 con fines de aplicabilidad del índice ISCAFS.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. *Resultados de mediciones obtenidas fuente hídrica subterránea Cetime*

			Fuente hídrica subterránea Cetime			
No.	**Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos**	**Unidades**	**Ensayo 1**	**Ensayo 2**	**Ensayo 3**	**Valor normado (Res.2115/2007)**

1	Conductividad	µs/cm	121,00	120,00	130,00	1000
2	pH	Unidades de pH	5,8	6,0	6,80	6,5-9,0
3	Turbiedad	UNT	30,80	29,80	33,51	2
4	Color aparente	UPC	243,00	237,00	258,40	15
5	Fluoruros	mg/L	0,1	0,1	0,12	1,0
6	Calcio	mg Ca/L	12,11	73,34	16,03	60
7	Alcalinidad	mg $CaCO_3$/L	44,50	73,34	74,09	200
8	Cloruros	mg Cl-/L	<5,0	<5,0	<5,0	250
9	Aluminio	mg / Al L	0,17	0,25	0,19	0,2
10	Dureza total	mg $CaCO_3$/L	53,47	53,05	53,65	300
11	Hierro	mg Fe/L	1,67	2,97	0,70	0,3
12	Magnesio	mg Mg/L	<5,00	0,25	<5,00	36
13	Coliformes totales (NMP)	NMP/100 ml	<1,0	9,6x101	<1	Ausencia en 100 cm^3
14	Coliformes Termotolerantes (NMP)	NMP/100 ml	<1,0	<1,0	<1	Ausencia en 100 cm^3
15	Nitratos	mg NO_3-/L	<0,500	<0,500	56,00	10
16	Nitritos	mg NO_2-/L	0,04	0,04	<0,004	0,1
17	Sulfatos	mg SO_4 2-/L	<10,0	<10,0	<10,0	250
18	Olor y Sabor	Aceptable /No Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
19	Antimonio	mg Sb/L	<0,02	<0,02	<0,02	0,02
20	Arsénico	mg As/L	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
21	Bario	mg Ba/L	0,032	0,095	0,041	0,7
22	Cadmio	mg Cd/L	<0,001	<0,001	<0,001	0,003
23	Cobre	mg Cu/L	<0,005	0,005	<0,005	1,0
24	Cromo	mg Cr/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,05
25	Mercurio	mg Hg/L	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
26	Níquel	mg Ni/L	<0,005	<0,005	0,017	0,02
27	Plomo	mg Pb/L	0,010	<0,010	0,035	0,01
28	Selenio	mg Se/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,01
29	COT	mg COT/L	2,8	<1,65	4,02	5,0

30	Manganeso	mg Mn/L	0,1	0,1	<0,1	0,1
31	Molibdeno	mg Mo/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,07
32	Zinc	mg Zn/L	0,035	0,010	0,067	3
33	Cryptosporidium	ooquistes/ L	<0,1	<0,1	<0,1	(0) Ooquistes
34	Giardia	quistes/L	<0,1	<0,1	<0,1	(0) Quistes

Nota: Los parámetros resaltados se refieren a aquellos que no cumplen con el valor normado. Los ensayos 1,2 y 3 corresponden a los periodos de febrero, junio y septiembre del año 2023 con fines de aplicabilidad del índice ISCAFS. *Fuente: Elaboración propia.*

La Tabla 16 presenta los resultados obtenidos de la aplicación del índice socioambiental de la calidad del agua para las fuentes subterráneas el Abra y el Salvio, para esta investigación; de lo cual, , se evidenció que el índice socioambiental para las fuentes subterráneas hídricas (ISCAFS) clasifica la calidad del agua de las áreas rurales del municipio de Cota en una contaminación modera reflejado en un 57,27% el Abra, un 57,28% para el Salvio, 57,29% la Moya y un 57,25% para Cetime; si bien, la aproximación de estos resultados se encuentran relacionados con la cantidad de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos fuera del rango normativo, al igual que la cantidad de ensayos a considerar dentro de la formula, enfatizando a que los indicadores socioambientales se establecieron de manera estándar sin algún tipo de variabilidad dado a que estos se obtuvieron de forma tal que sean aquellos netamente aplicados para el municipio de Cota Cundinamarca y las dinámicas a las que se enfrenta este territorio.

Además de lo anterior, se observó que con respecto a los valores obtenidos en el índice socioambiental propuesto (ISCAFS) en la fuente el Abra y el Salvio, el comportamiento es similar; aclarando que estas se encuentran ubicadas en distintos espacios; sin embargo, las características sociales y ambientales no varían al encontrarse en el casco rural del municipio. De otra manera, se resalta que el comportamiento obtenido por este índice ha sido netamente intrínseco del territorio, ya que sus indicadores socioambientales fueron determinados bajo el marco del diagnóstica y la evaluación de impacto en las áreas del municipio de Cota; evidenciando cómo los indicadores de mayor ponderación como el crecimiento poblacional, el acceso a la educación, el sector económico, el agua para consumo

humano recibida en la comunidad han tenido significancia al momento de obtener condiciones óptimas y aptas para el consumo humano.

Es importante resaltar que de igual manera para estudios a futuro se debe considerar que, aunque los datos de calidad de agua son puntuales, es posible visualizar la variación de la calidad del agua en espacio a la ubicación con respecto de una fuente a la otra, por lo que se sugiere la utilización de un programa de calidad de agua que sea capaz de simular el transporte de los constituyentes incluidos en el índice como se realizó en la investigación por Vega (2009) en Puerto Rico. En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos al aplicar la ecuación del índice socioambiental (ISCAFS), plasmando cada uno de sus componentes para su posterior análisis y clasificación de la calidad del agua para el municipio de Cota en las áreas rurales.

Tabla 16. *Resultados obtenidos para la aplicación del índice socioambiental (-ISCAFS)*

Fuente subterránea	Ubicación (coordenadas)	F1 (Alcance)	F2 (Frecuencia)	F3 (Amplitud)	ISCAFS	Clasificación calidad del agua	Descripción
El Abra	(N. 04° 48' 12,5" W. 74° 06' 47,4")	23,52	16,17	47,66	**57,27**	Regular	Contaminación Moderada
El Salvio	(N. 04° 49' 38,2" W. 74° 05' 47,5")	23,52	16,66	25,13	**57,28**	Regular	Contaminación Moderada
La Moya	(N. 04° 49' 11,06" W. 74° 06' 8,47")	17,54	12,74	90,56	**57,29**	Regular	Contaminación Moderada
Cetime	(N. 04° 49' 14,0" W. 74° 06' 14,2")	14,70	10,78	71,41	**57,25**	Regular	Contaminación Moderada

Fuente: Elaboración propia.

Al identificar la calidad del agua con una contaminación moderada, es decir, regular para las personas de las áreas rurales del municipio de Cota, se logra asociar a la existencia de diversos agentes contaminantes, entre ellos las sustancias químicas (como plaguicidas, cianuro, herbicidas y otros), los residuos urbanos, las actividades derivadas de procesos

agrícolas e industriales; los cuales pueden generar enfermedades, daños en los ecosistemas o el medioambiente. El incremento de agentes contaminantes en las aguas es cada vez mayor debido a actividades antropogénicas. (Nas et al., 2008; Calvo, 2013). Por lo anterior, es de vital importancia el papel de los índices para lograr cuantificar, simplificar una cantidad grande de datos a un solo valor y comunicar información compleja, es lo que los ha hecho un medio efectivo para comunicar información (Swarnee y Tyagi, 2007; León, 1992).

Para que este índice lograra ser práctico, partió de un buen diseño, lo que conlleva a que el valor suministrado por el índice sea representativo de la calidad del agua y de su tendencia (León, 1992); de igual manera el índice (ISCAFS) permitió tener un mejor entendimiento en asuntos referentes a la calidad del agua, pero además de ello el lograr vincular componentes netos del comportamiento social, económico y ambiental del área de estudio siendo una herramienta vital por parte del público y los tomadores de decisiones (Cude, 2001).

Por otro lado, es importante tener en cuenta que entre los contaminantes químicos del agua subterránea se encuentran elementos potencialmente tóxicos como el arsénico (As) y los fluoruros (F), entre otros; los cuales, dependiendo de los usos del agua pueden causar efectos en la salud (Ali et. al, 2013) por lo que, para este caso, se optó por realizar ensayos de varios parámetros para ver el comportamiento de la calidad del agua en diferentes periodos del año 2023. En cuanto a los contaminantes microbiológicos, la Organización Mundial de la Salud (OMS,2022) estima que 829.000 personas mueren cada año por enfermedades relacionadas con la insalubridad del agua o una mala higiene, por ello es de alta importancia determinar la calidad microbiológica del agua en las fuentes de abastecimiento y dar a conocer los riesgos a la salud en las comunidades; es por ello, que desde la implementación del índice socioambiental (ISCAFS) se elaboró con el fin de incorporar los parámetros tanto fisicoquímicos y microbiológicos a considerar.

La metodología incorporada en la creación del índice socioambiental (ISCAFS), utilizó como base principal la metodología del Índice Canadiense de Calidad de Agua (CCME, por sus siglas en inglés), debido a que en el cálculo se consideró como criterio, el

número de veces que se exceden los límites máximos permisibles establecidos por normas para un determinado uso (Puente et. al, 2023); además de evidenciar que fue seleccionado por ser el más completo y flexible entre los índices disponibles en diferentes países (Hurley et.al, 2012). Por lo que el índice fue mucho más sensible y representativo ante los resultados de los muestreos y sus correspondientes determinaciones analíticas que los excedan. Se tuvo en cuenta que, aunque no se especifica un número máximo de parámetros en la creación de un índice, es recomendable que para el cálculo como mínimo cuatro parámetros del que se tengan al menos cuatro (4) deseados (Rojas et. al, 2008). Entendiendo que la selección de los parámetros es crítica para garantizar que el índice dé una información acertada del sistema que se estudia, por lo tanto, escoger un pequeño número de parámetros para los cuales no se cumple con lo normado dará una idea muy diferente del sistema de la que se obtiene si se considera un gran número de variables de las cuales solo un número pequeño no cumplirán con lo deseado (Fernández et. al, 2005) evidenciando que los márgenes de resultados van a generar una ponderación diferenciada al variar la cantidad de parámetros que se desean evaluar en el índice propuesto.

6.3.2. Comparación de índices de la calidad del agua para consumo humano

De acuerdo con el índice socioambiental propuesto para medición de la calidad del agua (ISCAFS), se realizó una comparación con el índice Canadian Council of Ministers of the Environment, conocido como CCME_WQI (por sus siglas en inglés) y el IRCA (índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano) Colombia; a partir de los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos presentados (Tabla 12, Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15). Los resultados comparativos se presentan en la Tabla 17, identificando sus formulaciones y los datos obtenidos aplicados a las fuentes hídricas subterráneas puestas en consideración para esta investigación (el Abra, el Salvio, la Moya y Cetime).

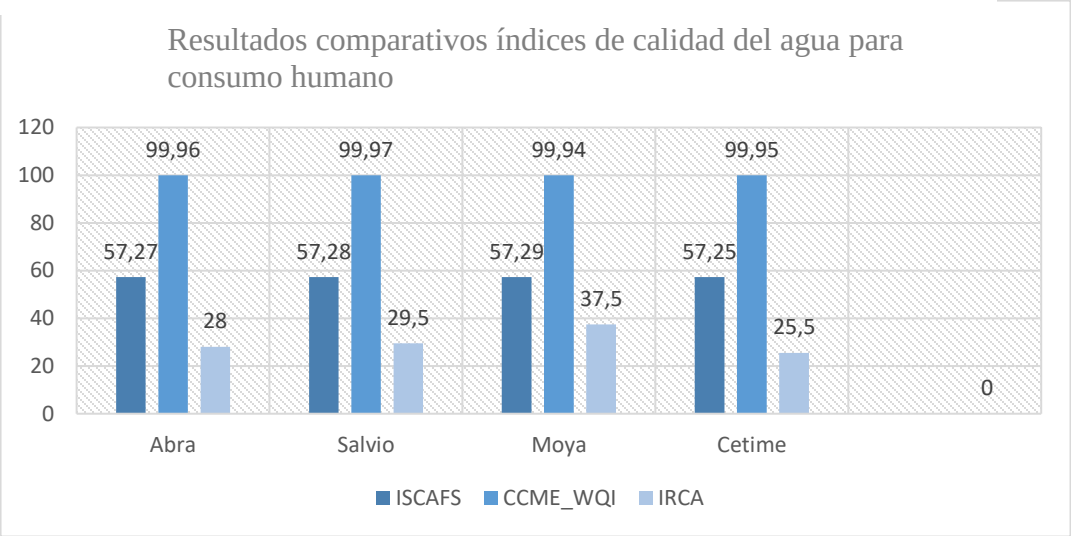
Tabla 17. *Resultados comparativos de índices de la calidad del agua fuentes subterráneas.*

	Índices Calidad del Agua			**Clasificación calidad del agua**		
Fuentes subterráneas	ISCAFS ISCAFS = 100 $-\left[\left\{\frac{\sqrt{F1^2+F2^2+F3^2)}}{1732}\right\}-\{CP+AE+CH+ST+RS\}\right]$	CCME_WQI CME_WQI = 100 $-\left\{\frac{\sqrt{F1^2+F2^2+F3^2}}{1732}\right\}$	IRCA IRCA= ∑ puntaje de riesgo asignado a las características no aceptables / ∑ puntaje de riesgo asignados a todas las características analizadas x 100	ISCAFS	CCME_WQI	IRCA
El Abra	57,27	99,96	28	Regular	Excelente	Severa
El Salvio	57,28	99,97	29,5	Regular	Excelente	Severa
La Moya	57,29	99,94	37,5	Regular	Excelente	Regular
Cetime	57,25	99,95	25,5	Regular	Excelente	Severa

Nota: ISCAFS (índice socioambiental de la calidad del agua en fuentes subterráneas) CCME_WQI(índice canadiense) IRCA (índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano. Res.2115 de 2007, Colombia)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. *Resultados obtenidos de índices de calidad del agua para consumo humano*



Fuente: Elaboración propia.

La comparación de los tres (3) índices de medición de la calidad del agua para consumo humano, específicamente el ISCAFS (índice socioambiental de la calidad del agua en fuentes subterráneas), CCME_WQI (índice canadiense), y el IRCA (índice de riesgo de la calidad del agua para consumo humano), proporciona información valiosa sobre la evaluación de la calidad del agua en las fuentes hídricas Abra, Salvio, Moya y Cetime**.**

Según la Tabla 17 y la Figura 13, se observó una discrepancia notoria entre los resultados de los índices ISCAFS y CCME_WQI, donde CCME_WQI indica una calidad del agua significativamente con mejor condición de la calidad del agua en comparación con el índice propuesto ISCAFS. Este contraste sugiere diferencias fundamentales en la metodología y ponderaciones de factores entre ambos índices, ya que si bien, el índice propuesto consideró la implementación de indicadores socioambientales intrínsecas del área de estudio teniendo en cuenta que estos proporcionan una evaluación más completa y justa de la calidad del agua (Gupta et al., 2012). A diferencia de otros índices que se centran solo en aspectos químicos o biológicos, un índice socioambiental adopta un enfoque holístico, abordando la interconexión entre el medio ambiente y las comunidades humanas (Araujo et al., 2012).

De acuerdo con el ISCAFS, en las cuatro (4) fuentes hídricas, el agua se cataloga como “contaminación moderada/ regular”, lo cual es una señal de alerta para los habitantes del área rural del municipio de Cota, debido a que el agua de estos lugares no cumple con los requerimientos para consumo humano, de manera directa. La puntuación para el índice canadiense de la CCME, en lo referente al agua para uso potable, calificó la calidad del agua de las fuentes subterráneas como “Excelente”, a pesar de poseer parámetros fisicoquímicos y microbiológicos fuera del rango normativo; este resultado podría indicar que esta metodología tiende a clasificar la calidad del agua en un rango más amplio, o bien, asigna mayor peso a ciertos parámetros que pueden no ser tan críticos para la evaluación local.

Por otra parte, el IRCA proporciona una evaluación diferente, con valores que se sitúan en un rango inferior en todas las fuentes hídricas, mencionando que este a diferencia de los otros índices propuestos considera un peso ponderado por cada parámetro en concordancia con la normatividad (Resolución 2115 de 2007); es por ello, que en la escala propuesta de evaluación y clasificación de la calidad del agua, tendrá como resultados en el Abra, el Salvio y Cetime, un agua para consumo humano en “contaminación severa”. Esto destaca la importancia de considerar diferentes enfoques y factores en la evaluación de la calidad del agua.

Al evidenciar la gran importancia y variabilidad del comportamiento de la calidad del agua con la aplicación de diferentes índices, se destaca la construcción del índice socioambiental propuesto ISCAFS, que si bien, ha sido considerado desde una visión para beneficio de la población rural, teniendo en cuenta que un índice socioambiental facilita la participación de las comunidades locales en la evaluación y gestión de la calidad del agua (Mafaldo & Santistevan, 2017). Autores como Holling (2001) subrayan la importancia de evaluar la resiliencia y la sostenibilidad en la gestión del agua.

El índice socioambiental ISCAFS consideró la capacidad de adaptación del sistema hídrico y su impacto a largo plazo. El generar un índice socioambiental a partir de la

información obtenida en campo y de manera literaria fue de vital importancia al establecer las metodologías referente a la selección de los indicadores socioambientales de mayor impacto para el municipio de Cota, lo cual permitió visualizar una evaluación más completa y contextualmente relevante de la calidad del agua, siendo sí, una diferenciación crucial para una gestión a futuro del agua más efectiva y sostenible en entornos diversos y cambiantes.

6.3.3. Análisis de Sensibilidad

Se ejecutó una prueba de análisis de sensibilidad en la Ecuación 6 del índice ISCAFS, variando los valores de los factores (F1: Alcance, F2: Frecuencia y F3: amplitud) y de los indicadores socioambientales *(CP: crecimiento poblacional, AE: acceso a la educación, CH: uso del agua para consumo humano, ST: sector económico terciario y RS: recolección de residuos)*, y observar cómo afectan el resultado final del índice aplicado para cada fuente subterránea analizada. En la Tabla 18 presentan los resultados de la variación obtenida a partir de lo propuesto para el análisis de sensibilidad.

Tabla 18. *Datos obtenidos en el análisis de sensibilidad de la ecuación (ISCAFS)*

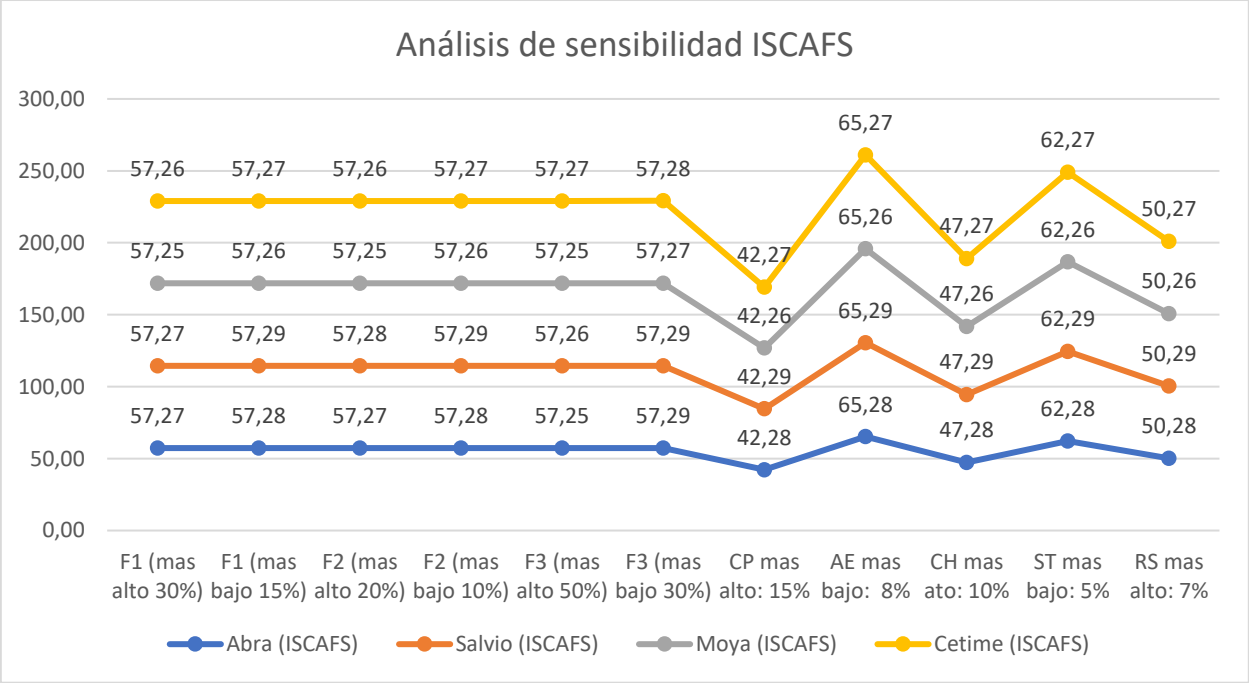
Variaciones variables (ISCAFS)	**Abra $ISCAFS_{nuevo}$**	**Salvio $ISCAFS_{nuevo}$**	**Moya $ISCAFS_{nuevo}$**	**Cetime $ISCAFS_{nuevo}$**	**Clasificación calidad del agua**
F1 (Más alto 30%)	57,27	57,27	57,25	57,26	**CLASE 3, REGULAR,**
F1 (Más bajo 15%)	57,28	57,29	57,26	57,27	
F2 (Más alto al 20%)	57,27	57,28	57,25	57,26	
F2 (Más bajo al 10%)	57,28	57,29	57,26	57,27	
F3 (Más alto al 60%)	57,25	57,26	57,25	57,27	
F3 (Más bajo al 30%)	57,29	57,29	57,27	57,28	
CP más alto: 15%	42,28	42,29	42,26	42,27	

AE más bajo: 8%	65,28	65,29	65,26	65,27	**CONTAMINACIÓN MODERADA**
CH más alto: 10%	47,28	47,29	47,26	47,27	**RANGO: 31-70**
ST más bajo: 5%	62,28	62,29	62,26	62,27	
RS más alto: 7%	50,28	50,29	50,26	50,27	

Nota: CP: crecimiento poblacional, AE: acceso a la educación, CH: uso del agua para consumo humano, ST: sector económico terciario y RS: recolección de residuos

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. *Resultados variaciones del análisis de sensibilidad en el ISCAFS*



Fuente: Elaboración propia.

Para realizar un análisis detallado de los datos a partir de la prueba de análisis ejecutada mediante la variación de las variables obtenidas para el ISCAFS en cada fuente hídrica subterránea reflejadas en la Tabla 18 y la Figura 14, se logró examinar las variaciones en el índice como respuesta a cambios en los factores **F1, F2, F3** (*Alcance, frecuencia y amplitud*) respectivamente, y a los componentes socioambientales **CP, AE, CH, ST y RS**

(*CP: crecimiento poblacional, AE: acceso a la educación, CH: uso del agua para consumo humano, ST: sector económico terciario y RS: recolección de residuos),* lo anterior bajo supuestos porcentuales que se determinaron al azar para identificar las variaciones posibles y el comportamiento a generarse por el índice socioambiental**.** A continuación, se presenta una interpretación minuciosa y puntual de los resultados obtenidos:

- **Variación de F1 (Alcance):**

  F1 (Más alto 30%):

  Todas las fuentes muestran un ligero aumento en el ISCAFS.

  El Abra y El Salvio tienen los mayores incrementos, mientras que Cetime presenta el menor.

  F1 (Más bajo 15%):

  Se observó una leve disminución en el ISCAFS para todas las fuentes.

  La Moya tuvo la disminución más pronunciada, mientras que El Salvio se evidenció la menos pronunciada.

- **Variación de F2 (Frecuencia):**

  F2 (Más alto 20%):

  Las fuentes mostraron un aumento moderado en el ISCAFS.

  El Abra y El Salvio experimentaron los mayores incrementos.

  F2 (Más bajo 10%):

  Se observó una disminución en el ISCAFS para todas las fuentes.

  El Salvio mostró la disminución más marcada.

- **Variación de F3 (Amplitud):**

  F3 (Más alto 50%):

  Todas las fuentes presentaron una ligera disminución en el ISCAFS.

  El Abra y Cetime presentaron las disminuciones más notables.

  F3 (Más bajo 30%):

  Se observó un aumento en el ISCAFS para todas las fuentes.

  El Salvio y Cetime presentaron los mayores aumentos.

- **Variación de indicadores socioambientales (CP, AE, CH, ST y RS):**

  CP (Crecimiento poblacional más alto 15%):

  Todas las fuentes experimentan una marcada disminución en el ISCAFS.

  La Moya muestra la disminución más pronunciada.

  AE (Acceso a la Educación más bajo 8%):

  Todas las fuentes presentaron un aumento significativo en el ISCAFS.

  La Moya y Cetime se consideraron con los mayores aumentos.

  CH (Agua de uso para consumo humano más alto 10%):

  Se observó una disminución en el ISCAFS para todas las fuentes.

  El Abra y Cetime presentaron las disminuciones más notables.

  ST (Sector económico terciario más bajo 5%):

  Todas las fuentes experimentaron una marcada disminución en el ISCAFS.

  El Abra muestra la disminución más pronunciada.

  RS (Recolección de residuos más alto 7%):

  Se observó una disminución en el ISCAFS para todas las fuentes.

  La Moya tuvo la disminución más pronunciada.

6.3.4. ANOVA y Análisis de Sensibilidad mediante Python

Tabla 19. *Análisis ANOVA Python*

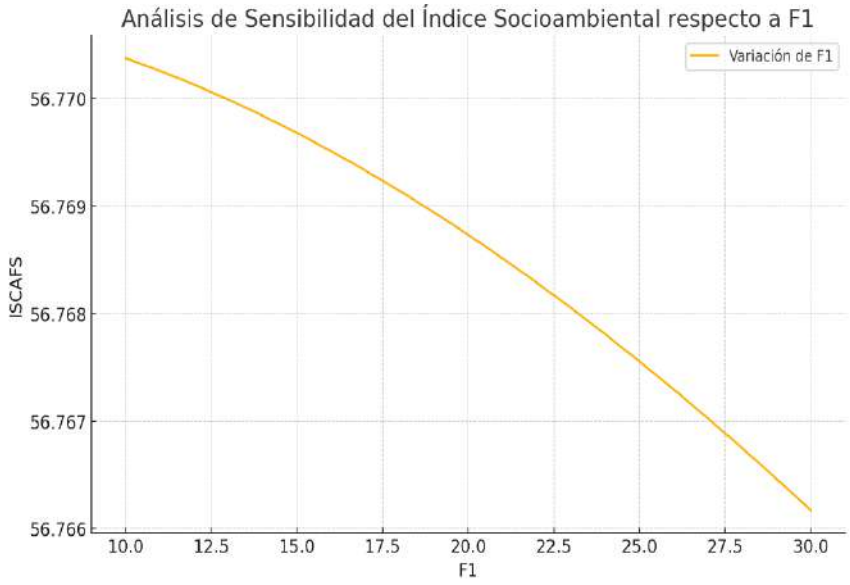
Fuente subterránea	***ISCAFS Monte Carlo simulación***	***Desviación estándar ISCAFS***
El Abra	100	0,0
La Moya	100	0,0
El Salvio	100	0,0
Cetime	100	0,0

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados mostraron que el valor promedio del índice propuesto (ISCAFS) para todas las ubicaciones es 100 con una desviación estándar de 0. Esto indica que, bajo las variaciones en los factores F1, F2 y F3 y los componentes socioeconómicos considerados en

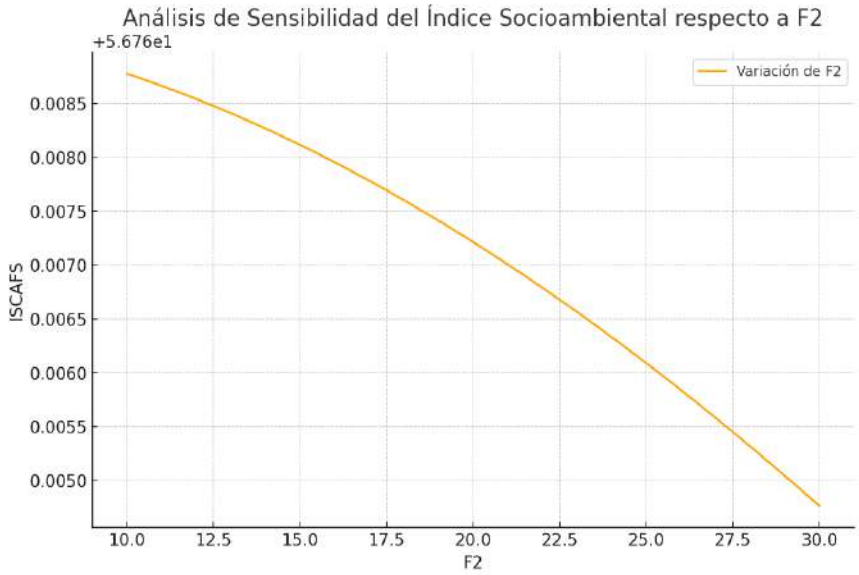
el rango especificado, el índice ISCAFS se mantiene constante en 100. Por otra parte, estos resultados sugieren que el índice ISCAFS, tal como está formulado, no es sensible a las variaciones en los parámetros F1, F2 y F3 y los indicadores socioeconómicos dentro de los rangos considerados; esto puede ser debido a que el término socioeconómico agregado (CP + AE + CH + ST + RS) es lo suficientemente grande para asegurar que el valor calculado del índice siempre se redondee a 100. El resultado del ANOVA reflejó que las entradas proporcionadas son constantes para todas las ubicaciones, lo que provoca que el valor de la estadística F no esté definido, esto se debe a que todas las muestras tienen el mismo valor (100) y, por lo tanto, no hay varianza entre las muestras.

Figura 15. *Análisis de Sensibilidad F1 ISCAFS Python*



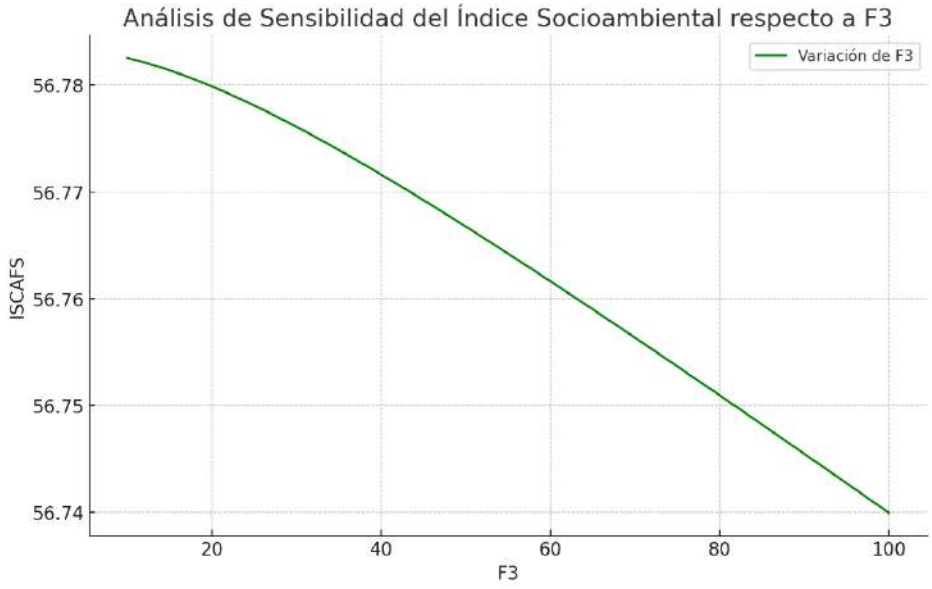
Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. *Análisis de sensibilidad F2 ISCAFS Python*



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. *Análisis de sensibilidad F3 ISCAFS Python*



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de sensibilidad permitió observar cómo varía el Índice Socioambiental (ISCAFS) propuesto en función de los cambios en los valores de los factores F1, F2 Y F3. Los gráficos generados reflejaron la relación entre cada uno de estos factores y el índice, ayudando a identificar qué factor tiene un mayor impacto en la variación del ISCAFS. Si bien, se identificó que el índice ISCAFS disminuye a medida que F1 aumenta, en donde, la relación parece ser lineal en el rango de valores estudiados (10 a 30). Similar al caso de F1, el índice ISCAFS disminuye a medida que F2 aumenta, en donde la pendiente de la curva sugiere una relación lineal entre F2 y el ISCAFS en el rango; finalmente, el índice ISCAFS también disminuye a medida que F3 aumenta y a relación entre F3 y el ISCAFS parece ser lineal, aunque con una pendiente más pronunciada, indicando un impacto mayor comparado con F1 y F2.

Por lo tanto, a medida que el alcance (F1) de los factores socioambientales aumenta, el índice socioambiental disminuye, lo que indica una peor calidad del agua subterránea, esto sugiere que F1 es un factor significativo en la determinación del ISCAFS y, por lo tanto, debe ser cuidadosamente monitoreado y gestionado. La frecuencia (F2) de los factores socioambientales tiene un impacto negativo en el índice socioambiental, similar al alcance, siendo así, el hecho de que la pendiente sea similar a la de F1 indica que tanto el alcance como la frecuencia tienen un impacto comparable en la calidad del agua subterránea. La amplitud representada en (F3) de los factores socioambientales muestra una disminución más pronunciada en el índice socioambiental, sugiriendo que la variabilidad en los factores socioambientales puede tener un impacto más severo en la calidad del agua subterránea, lo que implica que las fluctuaciones en los factores socioambientales deben ser controladas más estrictamente para mantener una buena calidad del agua para el consumo humano. El factor F3 (amplitud) muestra la pendiente más pronunciada, indicando que su impacto en el índice socioambiental es mayor en comparación con F1 y F2, lo que evidencia que la amplitud de las variaciones en los factores socioambientales es un factor crítico para considerar.

Por otro lado, se identificó que las variaciones en los factores impactaron de manera diferencial en cada fuente hídrica subterránea, identificando que la sensibilidad del índice a cambios en los indicadores socioambientales y factores de calidad del agua es evidente. Cada fuente respondió de manera única a las variaciones, lo que destacó la importancia de

considerar las características específicas de cada sitio para una gestión adecuada del agua. Se evidenció que los factores correspondientes a (F1: Alcance, F2: Frecuencia y F3: amplitud) adoptados de la ecuación formulada por el índice canadiense, son factores que, si bien en la Tabla 18 siguen en un estándar de la calidad del agua para consumo humano en contaminación moderada, siendo esta regular para los habitantes de las áreas rurales. De acuerdo con ello, fue bastante significativo generar la adaptación de este índice con el propuesto en esta investigación ya que si bien este permitió la comparación de valores determinados para cada parámetro con un punto de referencia, leyes, normas o guías de calidad del agua que cuente con concentraciones y límites permisibles; dada su flexibilidad en los parámetros para el investigador (CCME, 2001). Khan, Paterson y Khan (2004) indican que un índice debe ser una herramienta que proporciona resúmenes significativos de la calidad de agua expresados en valores que son entendibles tanto para las personas con estudios técnicos como para personas naturales que no están vinculadas a estas ciencias, proporcionando una visión general del desempeño ambiental.

El análisis de sensibilidad desempeñó un papel crucial en la evaluación de índices socioambientales, como el propuesto ISCAFS, ya que permitió comprender cómo las variaciones en los parámetros y factores de entrada afectan la robustez y la confiabilidad del índice. Si bien, este análisis ayudó a identificar qué factores tienen un impacto significativo. Esto es crucial para entender cuáles son los elementos críticos que pueden influir en las clasificaciones finales (Saltelli et al., 2008). Es importante la ejecución de este análisis para la mejora en la toma de decisiones, ya que al identificar los resultados se identificó que el impacto de variaciones en los indicadores socioambientales son determinantes en el funcionamiento del índice socioambiental propuesto (ISCAFS) y son los de mayor representatividad al generarse una alteración, no obstante se enfatiza en que en este estudio se determinaron aquellos netamente en función del territorio y del área rural, por lo tanto, el índice en la Figura 16 se ve de forma constante lo largo de las variaciones; sin embargo el impacto notorio se da con lo referente a lo socioambiental; es por ello, esto permite a los gestores y responsables de políticas identificar estrategias efectivas para mejorar la calidad del agua (Hill et al., 2000).

Además de lo anterior, un aspecto fundamental observado a partir de los resultados de variación es el lograr identificar el índice en el marco de la adaptabilidad a cambios ambientales, donde éstas pueden cambiar de manera significativa y el análisis de sensibilidad proporcionará información sobre la capacidad de adaptación del índice, esto es esencial para su aplicabilidad a largo plazo (Samboni et al., 2007). Para el índice socioambiental propuesto (ISCAFS), fue crucial identificar los factores menos sensibles ya que según lo propuesto por Sobol (2001) esto puede ayudar a optimizar la asignación de recursos para la recopilación de datos y análisis a futuro, que para este caso a comparación de otros índices de la calidad del agua los valores están bajo una escala estándar de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos únicamente; evidenciando que los indicadores socioambientales propuestos hacen el balance fundamental para que el índice sea robusto y permita un análisis a partir de las condiciones intrínsecas de las áreas rurales en el municipio; las variaciones permitieron evidenciar que los impactos a nivel poblacional son un factor clave ante las dinámicas de la calidad del agua así como el acceso a la educación siendo indicadores que a un futuro permitirán mejorar la fiabilidad del índice bajo lo propuesto por Makowski (2006) al comprender cómo pequeñas variaciones en los factores afectan el índice, se pueden realizar ajustes para mejorar la precisión y la fiabilidad de las condiciones de la calidad del agua.

7. Conclusiones

La revisión bibliográfica y las fases metodológicas empleadas permitieron obtener un panorama mucho más concreto referente a los tipos, variables y enfoques de los indicadores socioambientales; identificado de este modo aquellos que han sido de mayor implementación con resultados satisfactorios. Si bien esta información de manera previa mejoró la determinación referente a la selección de manera objetiva de los indicadores que se lograron implementar para la construcción del índice socioambiental. Además de lo anterior, fue relevante realizar una revisión en cuanto los estudios ejecutados en torno al agua en fuentes subterráneas, esto permitió obtener un panorama de aplicabilidad mucho más amplio para la obtención de los indicadores socioambientales y de la información a disponer para la ejecución de dicho trabajo investigativo.

El proponer un índice socioambiental de la calidad del agua de consumo humano para las fuentes hídricas subterráneas de las áreas rurales del municipio de Cota (ISCAFS) a partir de índices propuestos e indicadores socioambientales de mayor impacto) se generó de forma muy puntual y precisa para el lugar de estudio de esta investigación; si bien, el cálculo de los indicadores específicos de corte socioambiental puede volverse un componente "fijo" o de escasa variación y prácticamente sus datos equivalentes cuando se aplique a las cuatro fuentes no permitió identificar una variación significativa. Además de ello, se evidencia que si se continúa un mayor estudio que permita la aplicabilidad exitosa del mismo logre ser una herramienta posible diagnóstica referente a las acciones de vigilancia y control de la calidad del agua para consumo humano del municipio.

La validación del índice socioambiental de la calidad del agua subterránea desarrollado demostró que la metodología implementada se fundamentó en condiciones específicas del área de estudio. La prueba piloto reveló condiciones estables para el determinante socioambiental generado, con mínimas variaciones observadas. Sin embargo, los análisis realizados indicaron que estos resultados no son suficientes para garantizar su aplicabilidad definitiva. Por lo tanto, es crucial desarrollar herramientas adicionales con mayor robustez y precisión, como tecnologías avanzadas o software especializado. Estas

herramientas permitirán una validación más rigurosa que considere factores como disponibilidad de tiempo, costos, trabajo de campo y otras consideraciones relevantes. Además de ello, en la gestión de la calidad del agua subterránea del área rural del municipio de Cota debe enfocarse en controlar y minimizar las variaciones en el alcance, la frecuencia, y especialmente la amplitud de los factores socioambientales, implementando estrategias específicas que deben ser desarrolladas para monitorear estos factores y mitigar sus efectos negativos. Si bien, se observó durante la validación que el índice responde a las condiciones particulares tanto sociales como ambientales, pero que por otro lado su nivel de variabilidad también estará influenciado por factores externos como el tiempo y el lugar de estudio, entre otros. Por otra parte, es esencial diferenciar claramente las contribuciones numéricas de cada componente o dimensión (socioambiental y técnica) en el índice final de calidad del agua. Esto se logra mediante métodos de ponderación explícita o a través de la asignación de pesos específicos a cada indicador dentro de su respectivo componente.

Es importante conocer las bases metodológicas referente a la selección de indicadores socioambientales antes de aplicarlas y ejecutarlas, ya que en muchas ocasiones estas son elaboradas para problemas específicos de una región, y no se acoplan a otras fuentes que van a ser estudiadas; por lo tanto, la elaboración o adaptación de un indicador sería la mejor opción para el uso de estos indicadores.

La metodología de Videla y Schroh, al igual que la metodología del proceso de análisis jerárquico AHP, brindó información valiosa sobre la importancia relativa de los indicadores y permitió establecer escalas para evaluar el impacto humano en las fuentes hídricas subterráneas del municipio en las áreas rurales. Se evidenció que los indicadores de calidad de vida son de alto impacto para el municipio, lo que sugiere que debe generarse estrategias referentes a las situaciones que se vienen presentando por el alto crecimiento poblacional que ha generado afectaciones conjuntas en el uso de suelo y el uso hídrico. De igual manera, esta clasificación y selección de indicadores mediante la ponderación de matrices permitió identificar aquellos sectores que no se encuentran en óptimas condiciones en el territorio, un ejemplo de ello fue el identificar el déficit que se presenta en la investigación científica y el determinar las especies en peligro de extinción, así mismo se

logró establecer que se necesitan de estrategias que permitan un impacto que logre mejorar todos estos impactos.

Es importante evidenciar que a pesar de los estudios y análisis elaborados, no existe un indicador universal, limitando así el uso de ciertos indicadores a regiones o problemas ambientales específicos, por lo que la evaluación individual por indicador sigue siendo una tarea dispendiosa y necesaria en la estimación de la calidad o contaminación del agua; de acuerdo con ello, se resalta que cada área de investigación a tener en cuenta para la generación de un índice de calidad del agua es necesario evaluarla desde los aspectos socioambientales y económicos, ya que esto permitirá un análisis de manera holística, que permitirán la toma de decisiones a futura de manera más enfocada y puntual ante la resolución de las medidas para la prevención de enfermedades a futuras e incidencias en la salud pública de las comunidades entre otros.

8. Recomendaciones

En el proceso de análisis Jerárquico y su ponderación obtenida mediante matrices, dejan en los resultados la consideración de tener en cuenta que estos pueden experimentar cambios con el tiempo; por lo tanto, se aconseja contemplar acciones de mejora que sean adaptables y evolucionen con el fin de cumplir con el objetivo que se llegue a requerir en posibles investigaciones. Asimismo, es prudente repetir periódicamente todo el proceso, incorporando nuevos indicadores, como, por ejemplo, considerar muchos más sectores referentes a posibles indicadores adicionales como el sector turismo, ya que este también tiene un significativo impacto en los territorios, que para este caso puntual de investigación no se tuvo en cuenta.

Es importante mencionar que el índice socioambiental generado está bajo condiciones netamente de un territorio específico, por lo tanto se recomienda que este logre ser difundido a la comunidad para tomar decisiones de gestión ambiental conforme a la calidad del agua, en donde las dinámicas van a ser cambiantes a lo largo del tiempo, por otro lado se especifica en la importancia de generar un modelo de variación a lo largo de los tramos de las fuentes subterráneas entendiendo que su comportamiento va a ser diferente a lo que se conoce para los estudios de fuentes hídricas superficiales. Se sugiere que este índice socioambiental, logre ser validado mediante otra serie de herramientas o programas de análisis mucho más completos, además de sugerir un contexto de análisis similar para identificar si evidentemente este es un índice socioambiental que sólo logrará ser replicado en lugares de estudios similares al de esta investigación. Es fundamental validar el índice desarrollado mediante comparaciones con estudios previos, análisis estadísticos robustos y consulta con expertos en ambos campos (socioambientales y técnicos). Esto asegura la consistencia de los resultados y la relevancia del índice en el contexto de evaluación de la calidad del agua para consumo humano. Al seguir esta recomendación técnica, se garantiza que el índice de calidad del agua desarrollado sea una herramienta efectiva y completa para evaluar la idoneidad del agua para consumo humano, integrando tanto aspectos socioambientales como técnicos de manera transparente y diferenciada.

Anexos

Anexo 1. Encuesta percepción calidad del agua para consumo humano habitantes rurales.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS	**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS** **MAESTRÍA EN DESARROLLO SUSTENTABLE Y GESTIÓN AMBIENTAL** Encuesta percepción calidad del agua para la comunidad rural en el municipio de Cota Cundinamarca	TESIS TITULADA: **INDICE SOCIOAMBIENTAL PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AGUA EN FUENTES SUBTERRÁNEAS RURALES: MUNICIPIO DE COTA, CUNDINAMARCA (COLOMBIA)**

Nombre:

Fecha:

GÉNERO	Masculino: Femenino:	**EDAD**		**SECTOR RESIDENCIAL**	Rural: Urbano:
NIVEL EDUCACTIVO (Seleccione mediante una X)	Primaria	Secundaria	Bachiller	Técnico o tecnólogo	Profesional
1.¿Pertenece usted a algún grupo étnico o comunidad indígena?				SI	NO
2. ¿El municipio le genera algún subsidio económico o ayuda para obtener agua para consumo humano de calidad?				SI	NO
3. ¿Considera usted que el crecimiento de la población en el municipio ha afectado la calidad del agua?				SI	NO
4. ¿Conoce usted de dónde proviene el agua para consumo humano que abastece al municipio?				SI	NO
5.¿El uso que destina al agua subterránea es exclusivamente para consumo humano?				SI	NO
6. ¿Usted lava periódicamente sus tanques de almacenamiento de agua potable?				SI	NO
¿Cuál es el mayor problema que evidencia en el agua de consumo humano en su sector o vereda?					
¿Qué le hace falta a su sector para tener una mejor calidad del servicio de agua para consumo humano? Seleccione mediante una X.					
Calidad del agua (color, aspecto, otros)	**Continuidad en el servicio**	**Lavado periódico de tanques**	**Buenos sistemas de tratamiento**	**Mejorar las**	**Implementar programas**

				políticas públicas	**con las empresas de servicios**
OTROS, ¿CUÁLES? :					
¿Cuál cree que es su responsabilidad como ciudadano frente a las fuentes hídricas de consumo humano?					
¿Cómo considera la calidad del agua que llega a su casa para consumo humano?					
¿En su sector hacen algún control de la calidad del agua para consumo?					
¿En su casa cuenta con tanque de almacenamiento de agua potable? ¿Cada cuánto le hace mantenimiento? ¿Cómo lo realiza?					
¿Utiliza pozos subterráneos para la captación de agua para consumo humano?					
Si utiliza pozo subterráneo para captación de agua ¿Qué acciones realiza para su mantenimiento? ¿Para qué usos destina esa agua en su casa?					
¿Considera usted que en su sector las personas se ven afectadas por la calidad del agua?					
¿Cuál es la actividad a la cual se le demanda mayor uso de agua en el sector?					
PROBLEMAS DE SALUD ASOCIADAS A LA CALIDAD DEL AGUA					
Indique qué tipos de problemas de salud presenta o ha presentado usted, o algún familiar que viva con usted derivados del consumo de agua potable. Seleccione mediante una X:					
Dolor de cabeza	SI : NO:		**Dolor abdominal**	SI : NO:	
Hepatitis A	SI : NO:		**Alergias**	SI : NO:	
Dermatitis	SI : NO:		**Infecciones en la piel**	SI : NO:	
Diarreas constantes	SI : NO:		**Parásitos intestinales**	SI : NO:	

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Matrices de pares, aplicación de metodología AHP para la ponderación de indicadores socioambientales

INDICADORES/ CRITERIOS	Matriz comparación de Pares AHP (A)							Matriz Normalizada							PROMEDIO (P)	porcentaje %	PRIORIZACIÓN	AXP
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7				
1)CALIDAD DE VIDA	1	3	6	3	3	2	3	0,333	0,319	0,295	0,398	0,264	0,173	0,125	0,27	27,3	1,91	2,589313669
2)EDUCACIÓN	1/3	1	1/3	1	5	5	1	0,111	0,106	0,016	0,133	0,441	0,434	0,042	0,18	18,3	1,28	1,806406721
3)RESIDUOS SÓLIDOS	1/6	3	1	1/3	1/5	1/3	2	0,056	0,319	0,049	0,044	0,018	0,029	0,083	0,09	8,5	0,60	0,91341401
4)USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL	1/3	1	3	1	1	2	5	0,111	0,106	0,148	0,133	0,088	0,173	0,208	0,14	13,8	0,97	1,347284374
5)USO DEL RECURSO HÍDRICO	1/3	1/5	5	1	1	1	7	0,111	0,021	0,246	0,133	0,088	0,087	0,292	0,14	14,0	0,98	1,368210081
6)INGRESOS ECONÓMICOS	1/2	1/5	3	1	1	1	5	0,167	0,021	0,148	0,133	0,088	0,087	0,208	0,12	12,2	0,85	1,124510613
7)CONSERVACIÓN E INVESTIGACIÓN	1/3	1	2	1/5	1/7	1/5	1	0,111	0,106	0,098	0,027	0,013	0,017	0,042	0,06	5,9	0,41	0,576048413
TOTAL	**3**	**9,4**	**20,3333333**	**7,5333333**	**11,34285714**	**11,5333333**	**24**	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,00	100	7	9,72518788

Fuente: Elaboración propia.

CI=(nmax-n)/(n-1)	0,454
RI=1,98*(n-2)/n	1,414
CR=CI/CR	0,321

Anexo 3. Matrices de pares, aplicación de metodología AHP para la ponderación de variables calidad de vida

MATRIZ DE COMPARACIÓN SUBCRITERIOS DEL INDICADOR CALIDAD DE VIDA												
Subcriterios	Matriz A				Matriz Normalizada				PROMEDIO (P)	PORCENTAJE (%)	PORCENTAJE (27%)	PRIORIZACIÓN	AXP
	1	2	3	4	1	2	3	4					
Crecimiento poblacional	1	1	5	5	0,41666667	0,39473684	0,53571429	0,41666667	0,44	44,09	11,91	1,76	1,85
Densidad poblacional	1	1	3	3	0,41666667	0,39473684	0,32142857	0,25	0,35	34,57	9,33	1,38	1,43
Acceso a servicios básicos	1/5	1/5	1	3	0,08333333	0,07894737	0,10714286	0,25	0,13	12,99	3,51	0,52	0,54
Centros de salud	1/5	1/3	1/3	1	0,08333333	0,13157895	0,03571429	0,08333333	0,08	8,35	2,25	0,33	0,33
TOTAL	2,4	2,53333333	9,33333333	12	1	1	1	1	1	100	27	4	4,14793233

CI=(nmax-n)	0,049
RI=1,98*(n-2	0,990
CR=CI/CR	0,050

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Matrices de pares, aplicación de metodología AHP para la ponderación de variables educación

MATRIZ COMPARACIÓN SUBCRITERIOS INDICADOR EDUCACIÓN											
	Matriz A			Matriz Normalizada							
Subcriterios	1	2	3	1	2	3	PROMEDIO (P)	PORCENTAJE(%)	PORCENTAJE (18%)	PRIORIZACIÓN	AXP
Acceso a la educación	1	3	1/3	0,75	0,75	0,25	0,58	58,3	10,5	1,75	1,97222222
Escolaridad	1/3	1	1	0,25	0,25	0,75	0,42	41,7	7,5	1,25	1,02777778
Centros de educación	1/3	1	1	0,25	0,25	0,75	0,42	41,7	7,5	1,25	1,02777778
TOTAL	1,3333333	4	1,333333	1	1	1	1	100	18	3	4,02777778

Fuente: Elaboración propia.

CI=(nmax-n)/(n-1)	0,514
RI=1,98*(n-2)/n	0,660
CR=CI/CR	0,779

Anexo 5. Matrices de pares, aplicación de metodología AHP para la ponderación de variables residuos sólidos

MATRIZ COMPARACIÓN SUBCRITERIOS RESIDUOS SÓLIDOS											
	Matriz A			Matriz Normalizada							
Subcriterios	1	2	3	1	2	3	PROMEDIO (P)	PORCENTAJE (%)	PORCENTAJE (9%)	PRIORIZACIÓN	AXP
Recolección de residuos	1	3	5	0,65217391	0,69230769	0,55555556	0,63	63,3	5,7	1,90	1,94562121
Manejo de residuos	1/3	1	3	0,2173913	0,23076923	0,33333333	0,26	26,0	2,3	0,78	0,79008217
Disposición final	1/5	1/3	1	0,13043478	0,07692308	0,11111111	0,11	10,6	1,0	0,32	0,31965812
TOTAL	1,53333333	4,33333333	9	1	1	1	1	100	9	3,00	3,05536149

Fuente: Elaboración propia.

CI=(nmax-n)/(n-1)	0,028
RI=1,98*(n-2)/n	0,660
CR=CI/CR	0,042

Anexo 6. Matrices de pares, aplicación de metodología AHP para la ponderación de variables uso del suelo

MATRIZ DE COMPARACIÓN SUBCRITERIOS USO DEL SUELO													
	Matriz A				Matriz Normalizada								
Subcriterios	1	2	3	4	1	2	3	4	PROMEDIO (P)	PORCENTAJE (%)	PORCENTAJE (14%)	PRIORIZACIÓN	AXP
Actividades agrícolas	1	1	5	1	0,30	0,25	0,5	0,3	0,34	33,8	4,7	1,35	1,55
Actividades ganaderas	1	1	1	1	0,30	0,25	0,1	0,3	0,24	23,8	3,3	0,95	1
Zonas urbanas/ asentamientos poblacionales	1/3	1	1	1/3	0,10	0,25	0,1	0,1	0,14	13,8	1,9	0,55	0,58
Actividades industriales	1	1	3	1	0,30	0,25	0,3	0,3	0,29	28,8	4,0	1,15	1,28
TOTAL	3,3333333	4	10	3,333333333	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100,00	14,00	4,00	4,41

Fuente: Elaboración propia.

CI=(nmax-n)/(n-1)	0,136
RI=1,98*(n-2)/n	0,990
CR=CI/CR	0,137

Anexo 7. Matrices de pares, aplicación de metodología AHP para la ponderación de variables uso hídrico

MATRIZ DE COMPARACIÓN SUBCRITERIOS USO HÍDRICO													
	Matriz A				Matriz Normalizada								
Subcriterios	1	2	3	4	1	2	3	4	PROMEDIO (P)	PORCENTAJE (%)	PORCENTAJE (14%)	PRIORIZACIÓN	AXP
Actividades agrícolas	1	3	5	1/3	0,22	0,26470588	0,3125	0,20588235	0,25	25,1	3,5	1,00	1,05392157
Actividades industriales	1/3	1	3	1/7	0,07	0,08823529	0,1875	0,08823529	0,11	10,9	1,5	0,44	0,44459034
Actividades ocasionales o lúdicas	1/5	1/3	1	1/7	0,04	0,02941176	0,0625	0,08823529	0,06	5,6	0,8	0,22	0,23
Consumo humano y doméstico	3	7	7	1	0,66	0,61764706	0,4375	0,61764706	0,58	58,4	8,2	2,33	2,49
TOTAL	4,533333333	11,33333	16	1,619048	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	100,00	14,00	4,00	4,22

Fuente: Elaboración propia.

CI=(nmax-n)/(n-1)	0,073
RI=1,98*(n-2)/n	0,990
CR=CI/CR	0,074

Anexo 8. Matrices de pares, aplicación de metodología AHP para la ponderación de variables ingresos económicos

MATRIZ DE COMPARACIÓN SUBCRITERIOS INGRESOS ECONÓMICOS											
	Matriz A			Matriz Normalizada							
Subcriterios	1	2	3	1	2	3	PROMEDIO (P)	PORCENTAJE (%)	PORCENTAJE (12%)	PRIORIZACIÓN	AXP
Sector Primario	1	1/3	1/3	0,14	0,077	0,2	0,14	14,0	1,7	0,42	0,42661783
Sector Secundario	3	1	1/3	0,43	0,231	0,2	0,29	28,6	3,4	0,86	0,8974359
Sector Terciario	3	3	1	0,43	0,692	0,6	0,57	57,4	6,9	1,72	1,85
TOTAL	7	4,3333333	1,66666667	1,00	1,00	1,00	1,00	100,00	12,00	3,00	3,18

Fuente: Elaboración propia.

CI=(nmax-n)/(n-1)	0,088
RI=1,98*(n-2)/n	0,660
CR=CI/CR	0,134

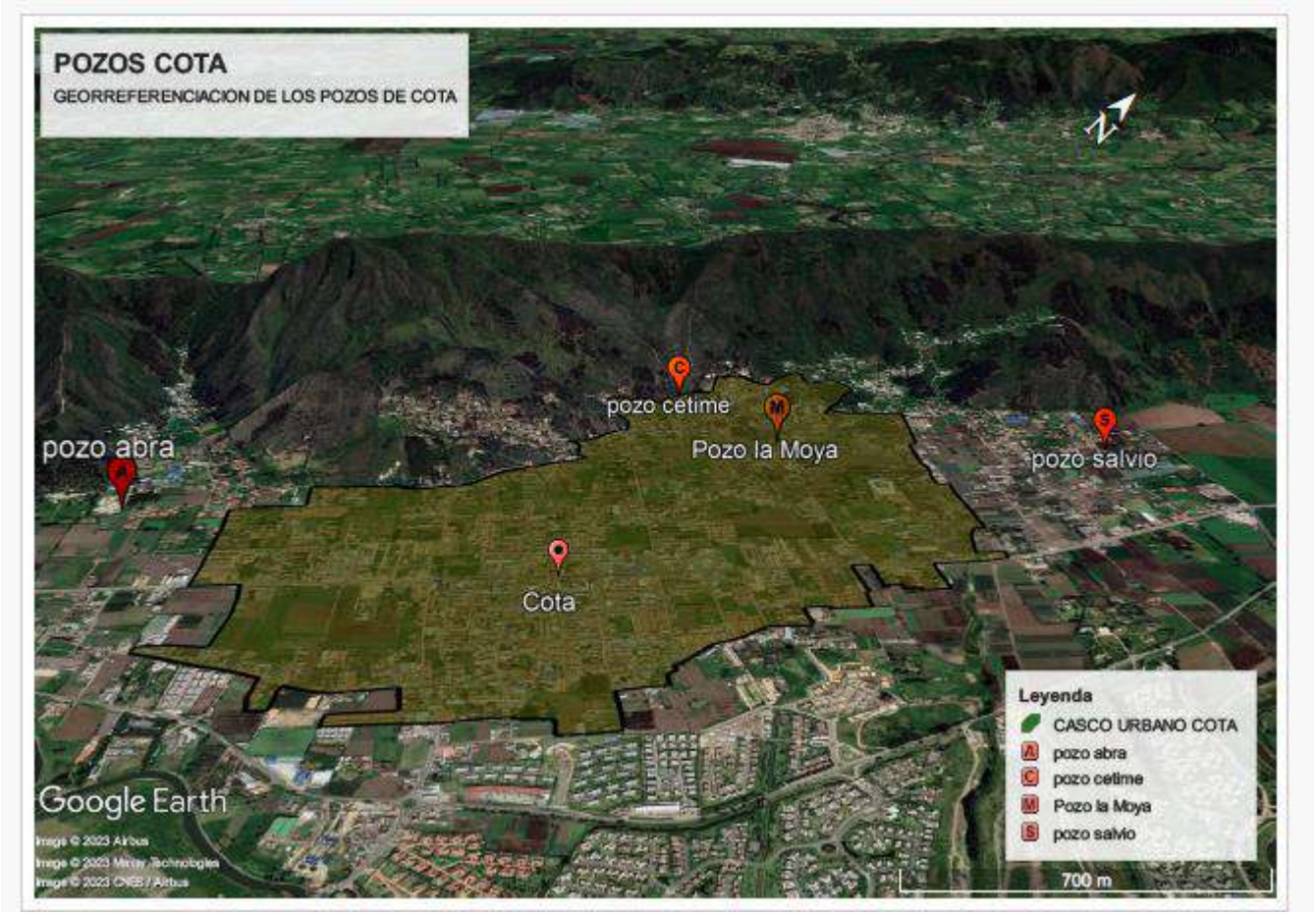
Anexo 9. Matrices de pares, aplicación de metodología AHP para la ponderación de variables investigación y conservación

Subcriterios	Matriz A			Matriz Normalizada			PROMEDIO (P)	PORCENTAJE (%)	PORCENTAJE (6%)	PRIORIZACIÓN	AXP
	1	2	3	1	2	3					
Áreas de conservación	1	3	5	0,65	0,692	0,55555556	0,63	63,3	3,8	1,90	1,95
Especies amenazadas	1/3	1	3	0,22	0,231	0,33333333	0,26	26,0	1,6	0,78	0,79
Investigación científica	1/5	1/3	1	0,13	0,077	0,11111111	0,11	10,6	0,6	0,32	0,32
TOTAL	1,53333333	4,33333333	9	1,00	1,00	1,00	1,00	100,00	6,00	3,00	3,06

Fuente: Elaboración propia.

CI=(nmax-n)/(n-1)	0,028
RI=1,98*(n-2)/n	0,660
CR=CI/CR	0,042

Anexo 10. Fuentes hídricas subterráneas identificadas en el municipio



Fuente: Elaboración propia.

Referencias

Abbasi, S.A. (2002). Water quality indices. Published by INCOH Secretariat, National Institute of Hydrology. University of Roorkee, India.

Abassi, M., Razzaghi, A. N. (2009). Removal of hazardous reactive blue 19 dye from aqueous solutions by agricultural waste. J. Iran. Chem. Res. 2,221-230

Alcaldía de Cota. (2022a). Mi Municipio. https://www.cota-cundinamarca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx

Alcaldía de Cota. (2023b). Secretaría y entidades. https://www.cota-cundinamarca.gov.co/SECRETARIASYENTIDADES/Paginas/Secretaria-de-Planeacion.aspx

Alberti, M., Parker, J. D. (1991). Indices of environmental quality: the search for credible measures. *Environmental Impact Assessment Review*, 11(2), 95-101.

Ali H., Khan E., Sajad M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881.

Alkan Olsson, J., Bockstaller, C., Stapleton, L.M., Ewert, F., Knapen, R., Therond, O., Geniaux, G., Bellon, S., Correira, T.P., Turpin, N., Bezlepkina, I., (2009). A goal-oriented indicator framework to support integrated assessment of new policies for agri-environmental systems. *Environ. Sci. Policy*, 12, 562–572.

Angermeier, P. L., & Karr, J. R. (2018). Ecological health indicators. Encyclopedia of Ecology, October, 391–401. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10926-1

Aragüés Lafarga, Ramón. (2011). Calidad del agua para el riego: efectos sobre plantas y suelos. En: Trillo C (dir.). Riego por aspersión. Huesca, Riegos del Alto Aragón: 18-23.

Araújo, L., Fernandes, E., Rosado, P. (2012). Índice de desarrollo socioambiental para el Estado de Bahía. *Problemas del desarrollo*, 43(170),101-123.

Arias, F. (2012). El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica. Caracas, Venezuela: Episteme.

Asare, B. K., Dankyi, O. D., Addy, M. A., & Gyamfi, D. E. (2021). Evaluación de la calidad del agua subterránea utilizando métodos de índice y análisis estadístico multivariado: cuenca del río Densu, Ghana. Revista de Sostenibilidad del Sur, 12(1), 1325-1344

Astier Calderón, Marta; Maass Moreno, Manuel; Etchevers Barra, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable Agrociencia, 36(5),605-620

Astier, M., Gonzáles, C. (2007). Formulación de indicadores socioambientales para evaluaciones de sustentabilidad de sistemas de manejo complejos. En: Astier, M. Masera, O., Galván-Miyoshi, Y. Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional. SEAE/CIGA/ECOSUR/CIEco /UNAM/GIRA/Mundiprensa /Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable. España

Astier, M., Hollands, J. (2007). Sustentabilidad y campesinado: seis experiencias agroecológicas en Latinoamérica. México: Mundiprensa.

Bakkes, J. A., van der Born, G. J., Helder, J. C., Swart, R. J., Hope, C. W., Parker, J. D. E. (1994). An overview of environmental indicators: state of art and perspectives. UNEP/RIVM, Nairobi, Kenia.

Balmaseda Espinosa, Carlos, García Hidalgo, Yoandris. (2014). Índice canadiense de calidad de las aguas para la cuenca del río Naranjo, provincia Las Tunas, Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(3), 11-16.

Bălteanu, D., & Dogaru, D. (2011). Geographical Perspectives on Human-Environment Relationships and Anthropic Pressure Indicators. Rom. Journ. Geogr, 55(2), 69–80.

Bergez J. E., Béthinger, A., Bockstaller, C., Cederberg, C., Ceschia, E., Guilpart, N., Lange, S., Müller, F., Reidsma, P., Riviere, C., Schader, C., Therond, O., van der Werf, H.M.G. (2022). Integrating agri-environmental indicators, ecosystem services assessment, life cycle assessment and yield gap analysis to assess the environmental sustainability of agricultura. *Ecological Indicators,* 141, 109107.

Bessouat, C., Castagnino, G., De los Santos, J., & Robano, M. (2001). Vulnerabilidad de un acuífero somero en medio poroso, presentado en ponencias del taller: Protección de acuíferos frente a la contaminación metodología. Recuperado de: http://tierra. rediris. es/hidrored.

Birk, S., Bonne, W., Borja, A., Brucet, S., Courrat, A., Poikane, S., Solimini, A., van de Bund, W., Zampoukas, N., Hering, D. (2012). Three hundred ways to assess Europe's surface waters: an almost complete overview of biological methods to implement the Water Framework Directive. *Ecological indicators*, 18, 31-41.

Bockstaller, C., Galan, M., Capitaine, M., Colomb, B., Mousset, J. Viaux, P. (2008). Comment évaluer la durabilité des systèmes en production végétale ?. En:: Raymond Reau éd., *Systèmes de culture innovants et durables: Quelle méthode pour les mettre au point et les évaluer ?* (pp. 29-51). Dijon cedex: Éducagri éditions.

Borrero García, C. B. (2018). *Metodología para determinación del índice de calidad del agua a partir de parámetros fáciles de medir en campo*. Trabajo de Maestría. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Burger, J. (2008). Assessment and management of risk to wildlife from cadmium. *Science of The Total Environment*, 389(1),37-45.

Cabero Almenara, J., Infante Moro, A. (2014). Empleo del método Delphi y su empleo en la investigación en Comunicación y Educación. *EDUTEC Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 48, 1-16.

Calvo-Brenes, G. (2015). Modelo de predicción de la calidad del agua en ríos basado en índices e indicadores del recurso hidrico y el entorno socio ambiental. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Campos, J. (2020). *Percepciones y actitudes hacia los perros que inciden en el comportamiento proambiental Bogotá.* Trabajo de grado. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME_WQI). (2001). Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. CCME Water Quality Index 1.0 Technical Report. https://unstats.un.org/unsd/envaccounting/ceea/archive/Water/CCME_Canada.PDF

Casasola, R. M. (2013). Implantación de un Sistema de Gestión Ambiental bajo la Norma UNE-EN ISO 14001: 2004 en el Colegio Oficial de Peritos e Ingenieros Técnicos Industriales de Valladolid. Trabajo fin de máster. Máster en gestión de prevención de riesgos laborales, calidad y medio ambiente. Universidad de Valladolid. España.

Castellanos, A. T. M. (2011). Caracterización socioambiental comunitaria. Líneas de acción en la comunidad "La Victoria". *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo*, 12(22).

Castro, D. J. (2002). *Indicadores de Desarrollo Sostenible Urbano: Una Aplicación para Andalucía*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Departamento de Economía Aplicada. Universidad de Málaga. Málaga, España.

Celemin, J. P., Mikkelsen, C. A., Velázquez, G. Á. (2015). La calidad de vida desde una perspectiva geográfica: integración de indicadores objetivos y subjetivos. *Revista Universitaria de Geografía*, 24(1), 63-84.

Cerón, L. M., Sarria, J. D., Torres, J. S., & Soto-Paz, J. (2021). Agua subterránea: tendencias y desarrollo científico. Información tecnológica, 32(1), 47-56.

Clemens, S., Aarts, M. G. M., Thomine, S. Verbruggen, N. (2013). Plant science: The key to preventing slow cadmium poisoning. *Trends in Plant Sciences*, 18(2), 92-99.

Corte Constitucional de Colombia. (2011). Sentencia T-740/11. El bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población son finalidades sociales del Estado. Será objetivo fundamental de su actividad la solución de las necesidades insatisfechas de salud, de educación, de saneamiento ambiental y de agua potable. https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2011/T-740-11.htm#:~:text=%E2%80%9CEl%20bienestar%20general%20y%20el,ambiental%20y%20de%20agua%20potable.

Cude, C.G. (2001). Oregon water quality index: a tool for evaluating water quality management effectiveness. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(1), 125-137

De Armas, J., Rodríguez, R., Zayas, D., Fernández, L. López, D. (1992). Parametrización oceanográfica en índices de calidad del agua. *Revista de Ingeniería Civil,* 86, 77-90.

De Risi, R., Jalayer, F., De Paola, F., Carozza, S., Yonas, N., Giugni, M., & Gasparini, P. (2020). From flood risk mapping toward reducing vulnerability: the case of Addis Ababa. Natural Hazards, 100, 387-415.

Dizdaroglu, D. (2015). Developing micro-level urban ecosystem indicators for sustainability assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, *54*, 119–124. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.06.004.

Echeverri, M. A., Harper, G. J. (2009). Fragmentación y deforestación como indicadores del estado de los ecosistemas en el Corredor de Conservación Choco-Manabí (Colombia-Ecuador). *Recursos Naturales y Ambiente,* 58,78-88.

Escobar, L. (2006). Indicadores sintéticos de calidad ambiental: un modelo general para grandes zonas urbanas. *Eure (Santiago),* 32(96), 73-98.

Evans, J. (2010). Sustentabilidad en Arquitectura. Compilación de antecedentes de manuales de buenas prácticas ambientales para las obras de arquitectura, junto a indicadores de sustentabilidad y eficiencia energética Buenos Aires: CPAU.

Fernández-Parada N. J. Solano-Ortega F. (2005). Índices de calidad (ICAs) de contaminación (ICOs) del agua de importancia mundial. En: Índices de calidad y de contaminación del agua. Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia.

Fernández, N.J., Solano, F. (2007). Índices de calidad y de contaminación del agua. Colombia: Universidad de Pamplona.

Filipič, M. (2012). Mechanisms of cadmium induced genomic instability. *Mutation Research*, 733(1 -2), 69-77.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2001). Indicadores de la calidad de la tierra y su uso para la agricultura sostenible y el desarrollo rural. Boletín de tierras y aguas de la FAO. Roma, Italia.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2013). La microcuenca como ámbito de planificación de los recursos naturales. Nota Técnica 1. https://www.fao.org/climatechange/30329-07fbead2365b50c707fe5ed283868f23d.pdf

Gabrielsen, P., Bosch, P. (2003). Environmental indicators: typology and use in reporting. EEA, Copenhagen.

Gallopín, G. C. (1982). El ambiente urbano y la planificación ambiental. En: Medioambiente y urbanización. Buenos Aires: CLACSA/CIFCA.

García, T. (2012). Propuesta de índices de calidad de agua para ecosistemas hídricos de Chile. Trabajo de grado. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

García, V.R., Gaspart, F., Kastner, T., Meyfroidt, P., (2020). Agricultural intensification and land use change: assessing country-level induced intensification, land sparing and rebound effect. *Environ. Res. Lett.*, 15(8),1-11

Giampietro, M. (1997). Socioeconomic pressure, demographic pressure, environmental loading and technological changes in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 65(3),201- 229.

Gokhale, M. (2007). Use of analytical hierarchy process in university strategy planning. Masters Theses. 4608. https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/4608

Gómez, M. A., Sandoval, L. A., Ávila, J. A. (2016). *Estudio de pre-factibilidad para el montaje de una planta de agregados pétreos a partir de residuos sólidos de construcción y demolición para la región de Bogotá.* Trabajo de grado. Especialización en Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

González, V., Caicedo, Aguirre, N. (2013). Aplicación de los índices de calidad de agua NSF, Dinius y BMWP. *Revista Gestión y Ambiente*, 16(1), 97-108.

Guillén, V., Teck, H., Kohlmann, B., Yeomans, J. (2012). Microorganismos como bioindicadores de la Calidad del Agua. *Tierra tropical: sostenibilidad, ambiente y sociedad,* 8(1), 65-93.

Gupta, P., Samant, K., Sahu, A. (2012). Isolation of cellulose-degrading bacteria and determination of their cellulolytic potential. *International journal of microbiology*, 2012, 578925.

Guttman Sterimberg, E., Zorro, C., Cuervo, A., Ramírez, J. C. (2005). Diseño de un sistema de Indicadores socio ambientales para el Distrito Capital de Bogotá. Proyecto "Evaluación social de la gestión ambiental" CEPAL/ PNUD COL/ 01/ 002. CEPAL – Serie Estudios y perspectivas. Bogotá, Colombia.

Guzmán, G.C.; Thalasso, F.; Ramírez, E.M.L.; Rodríguez, S.N.; Guerrero, A.L.B.; Avelar, F.J.G. (2011). Evaluación espaciotemporal de la calidad del agua del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(2), 89–102.

Hernández, R., Fernández, C. Baptista, P. (2006). Metodología de la Investigación: enfoques cuantitativo, cualitativo y mixto. México D.F.: McGraw-Hill/Interamericana.

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6th ed.). McGraw-Hill.

Hernández, C. A. C. (2011). Una aproximación teórica al medio ambiente sano como derecho fundamental. *Derecho y Realidad,* 9(18),212-220.

Holling, C.S. (2001). The Resilience of Terrestrial Ecosystems: Local Surprise and Global Change. Pages 292-317 En: W.C. Clark and R.E. Munn, editors. Sustainable Development of the Biosphere. Cambridge University Press, Cambridge, U.K

Hurley, J., Fernández-Macías, E., de Bustillo, R. M. (2012). Assessing recent employment shifts in Europe using a multidimensional job quality indicator. In Transformation of

the Employment Structure in the EU and USA, 1995–2007 (pp. 147-179). London: Palgrave Macmillan UK.

Ibáñez, Reyna (2012). Teoría y praxis. Indicadores de sustentabilidad: utilidad y limitaciones. En: El Periplo Sustentable. México: UABC

Kalhor, K., Ghasemizadeh, R., Rajic, L., Alshawabkeh, A. (2019). Assessment of groundwater quality and remediation in karst aquifers: A review. *Groundwater for Sustainable Development*, 8,104-121.

Khatri, N., Tyagi, S., Rawtani, D., Tharmavaram, M., & Kamboj R.D. (2020). Analysis and assessment of ground water quality in Satlasana Taluka, Mehsana district, Gujarat, India through application of water quality indices. Groundwater for Sustainable Development, 10. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100321

Khan, A., Paterson, R. y Khan, H. (2004). Modification and application of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for the communication of drinking water quality data in Newfoundland and Labrador. *Water Quality Research Journal of Canadá*, 39(3),285-293.

Kumar, P., Bansod, B., Debnath, S., Thakur, P., Ghanshyam, C. (2015). Index-based groundwater vulnerability mapping models using hydrogeological settings: A critical evaluation. *Environmental Impact Assessment Review,* 51, 38-49.

Ledesma García, M. (2018). *Procedimiento para asegurar la calidad del agua no potable de acuerdo con el análisis NOM-127-SSA1-1994 de la empresa lácteos de Chiapas Pradel SA de CV*. Informe Técnico de Residencia. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Chiapas, México.

Leinfelder, F., Tonello, K., Leal, M., Correa, C. (2019). Indicadores socioambientais na gestão integrada das sub-bacias da região metropolitana de Sorocaba, SP. *Sociedade & Natureza*, 31(November), 1–19.

León, L.(1992). Índices de calidad del agua (ICA), forma de estimarlos y aplicación en la Cuenca Lerma-Chapala. Trabajos presentados en el VIII Congreso Nacional, 1992, acciones para un ambiente limpio. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6147/1/ICA%20Forma%20de%20estimarlos.pdf

Li, Z., Wang, Y., & Zhang, Q. (2023). Integrating Remote Sensing and Socioeconomic Data for Water Quality Assessment in Rural Areas. *Remote Sensing of Environment*, 284, 113225. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113225

Liyanage, C., & Yamada, K. (2017). Impact of Population Growth on the Water Quality of Natural Water Bodies. Sustainability, 9(8), 1405. https://doi.org/10.3390/su9081405.

Loaiza, M. (2015). *Uso del criterio AHP para la toma de decisiones*. Trabajo de grado. Facultad de Economía y Planificación. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú

López, K. (2021). Determinación de la presión antrópica mediante indicadores socioambientales en la cuenca quebrada La Mesa, Piñas – Ecuador. Trabajo de grado. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.

Lovell, C., Mandondo, A., Moriarty, P. (2002). The Question of Scale in Integrated Natural Resource Management. *Conservation Ecology*, 5(2), 25.

Mafaldo Gómez, D. A., Santistevan Aveiga, A. O. (2017). *Incidencia del servicio del agua potable en la calidad social-ambiental de la parroquia Ricaurte, cantón Chone 2016-2017*. Trabajo de grado. Carrera de medio ambiente. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López. Calceta, Ecuador.

Martínez, L. C., Ramírez, J. A., & Pérez, E. M. (2022). Policy Implications of Socio-Environmental Water Quality Indices in Rural Communities. Water Policy, 24(4), 567-584. https://doi.org/10.2166/wp.2022.034

Méndez, Angela. (2013). Elaboración y ejemplificación de un sistema para la evaluación de proyectos mediante indicadores socioambientales en la cuenca del Lago de Amatitlán, Guatemala. Trabajo de Grado. Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.

Milovanovic, M. (2007). Water quality assessment and determination of pollution sources along the Axios/Vardar River, Southeastern Europe. Desalination, 213, 159-173. https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.06.022

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Protección Social. (2007). Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Colombia

Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). 2007. Reglamento para la Clasificación y Evaluación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales para la clasificación y la evaluación de la calidad de cuerpos de agua superficiales. No 33903 MINAE-S. Gaceta #178,. San José, Costa Rica.

Mohebbi, M.R.; Saeedi, R.; Montazeri, A.; Vaghefi, K.A.; Labbafi, S.; Oktaie, S.; Abtahi, M.; Mohagheghian, A. (2013). assessment of water quality in groundwater resources of Iran using a modified drinking water quality index (DWQI). *Ecological Indicators*, 30, 28 – 34.

Mondal, A., Biswas, S., & Gupta, S. (2023). Evaluación de la calidad del agua subterránea utilizando un índice de calidad del agua (ICA) modificado y análisis de componentes principales (PCA): un estudio de caso en el bloque de desarrollo de Purulia, Bengala Occidental, India. Revista de Hidrología Ambiental, 33(1), 100127.

Monod, H., Naud, C., Makowski, D. (2006). Uncertainty and sensitivity analysis for crop models. Working with Dynamic Crop Models Edited by Daniel Wallach, David Makowski and James W. Jones. Elsevier.

Mostert, Eric. 2003. Public Participation and Social Learning for River Basin Management. Proceedings MTM–IV–Public Participation and Social Learning. Holanda: Centre Delft University of Technology.

Morán, R. G. (2023). Estudio comparativo de sistemas constructivos a través de indicadores de sustentabilidad ambiental.

Munier, N. (2011). A strategy for using multicriteria analysis in decision-making: a guide for simple and complex environmental projects. Springer Science & Business Media.

Nasirian, M. (2007). A new water quality index for environmental contamination contributed by mineral processing: a case study of amang (tin tailing) processing activity. *Journal of applied sciences*, 7(20), 2977-2987.

Nguyen, T. V., Pham, Q. T., & Hoang, V. H. (2022). Water Quality Assessment in Rural Areas: Challenges and Solutions. Journal of Environmental Management, 295, 113054. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113054

Observatorio Regional Ambiental y de Desarrollo Sostenible del Río Bogotá (ORARBO). (2021). Información Ambiental para la Gestión Integral de la Cuenca Hídrica del Río Bogotá. Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano- IRCAm. Municipio de Cota. https://www.orarbo.gov.co/es/indicadores?id=945&v=l

Oladipo, J. O., Aboyeji, O. S., Akinwumiju, A. S., & Adelodun, A. A. (2020). Fuzzy Logic Interference for Characterization of Surface Water Potability in Ikare Rural Community, Nigeria. Journal of Geovisualizationand Spatial Analysis, 4(1), 1-14 1. https://doi.org/10.1007/s41651-019-0044-z

OCDE, "Main Science and Technology Indicators 1993 - 2".

Olivares, B. (2014). Aplicación del análisis de componentes principales (ACP) en el diagnóstico socioambiental. Caso: Sector Campo Alegre, municipio Simón Rodríguez de Anzoátegui. *Multiciencias*, 14(4), 364-374.

Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2022a). Arsénico. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic

Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2022b). Environmental health criteria 221: Zinc. http://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc_221/en/

Ortega Armenta, R. H., Leyva Aguilera, J. C., Sánchez Vázquez, M. A., Espejel Carbajal, I., Martínez, G. C. (2012). Diagnóstico socioambiental como fundamento para una estrategia de educación ambiental en Colonet, Baja California. *Región y sociedad*, 24(53), 153-187.

Ott, W. R. (1978). Environmental indices: theory and practice. Ann Arbor Science Publishers.

Palella, S.., Martins, F. (2011). Metodología de la investigación cuantitativa. Caracas, Venezuela: Fedupel.

Pandey, A. K., Kumar, M. D., & Sharma, R. K. (2021). Evaluación de la calidad del agua subterránea para consumo humano utilizando un índice de calidad del agua (ICA) modificado y análisis de componentes principales (PCA): un estudio de caso en el bloque de desarrollo de Unnao, Uttar Pradesh, India. Revista de Hidrología Ambiental, 31(1), 100097.

Pardo, A., Espinoza, M., Muñoz Aguirre, C., Román, M., Betancourt, R., Alvarado, C., Beetar Bechara, B., N., Díaz, O., Suárez Jiménez, B., Carrillo, Y., Suárez Manrique, W., Fortich Lozano, I., Buelvas Mendoza, M. (2020). Implicaciones socio-jurídicas que ha generado el reconocimiento jurisprudencial del derecho al agua como un derecho humano autónomo. Corporación Universitaria Rafael Núñez.

Patiño, P., Holguín, J., Barba-Ho, L., Cruz, C., Ramírez, C., Duque, A., Baena, L. (2004). Metodología para la adaptación de un Índice de Calidad del Agua a las condiciones medioambientales del Rio Cauca en el tramo Sarvajina-Virginia. Seminario Internacional: Visión integral en el mejoramiento de la calidad del agua. Universidad del Valle, Instituto Cinara.

Pentinat, S. B. (2014). Del derecho humano a un medio ambiente sano al reconocimiento de los derechos de la naturaleza. *Revista Vasca de Administración Pública. Herri-Arduralaritzako Euskal Aldizkaria*, 99-100, 649-680.

Pernía, B., Sousa A. D. E., Reyes R., Castrillo, M. (2008). Biomarcadores de contaminación por cadmio en plantas. *Interciencia*, 33(2), 112-119.

Piedrahita, J. (2018). *Análisis del índice de calidad del agua (ICA) e índice de contaminación del agua (ICOS) en Quebrada Villa ubicada en el Bagre, Antioquia.* Trabajo de grado. Facultad de Ciencias y Tecnologías. Universidad Santo Tomás. Bogotá, Colombia.

Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J., Rougier, J., Stephenson, D., Wagener, T. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. Environmental Modelling & Software, 79, 214-232.

Puente Miranda, D. G., Valenzuela García, L. I., Alarcón Herrera, M. T. (2023). Determinación histórica de índices de calidad del agua en observatorios participativos en el norte de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 39,127-137

Poikane, S., Birk, S., Böhmer, J., Carvalho, L., de Hoyos, C., Gassner, H., Hellsten, S., Kelly, M., Solheim, A., Olin, M., Pall, K., Phillips, G., Portielje, R., Ritterbusch, R., Sandin, L., Schartau, A., Solimini, A., van den Berg, M., Wolfram, G., van de Bund, W. (2015). A hitchhiker's guide to European lake ecological assessment and intercalibration. *Ecological indicators*, 52, 533-544.

Quiroga, R. (2001). Indicadores de sostenibilidad ambiental y de desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas. Naciones Unidas. CEPAL/ECLAC. División de Medio Ambiente y Asentamientos Humanos. Chile.

Quiroz, L., Ortíz, E., Moreno, I. (2018). Impacto socio ambiental de la calidad del agua del río Portoviejo en el período 2014-2017.Revista Electrónica Cooperación-Universidad-Sociedad, 3(3),34-36

Ramos, R., Sepúlveda, R., Villalobos, F. (2003). El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis. México: Plaza y Valdés.

Reyes, R. y Morales, R. (2021). Informe de calidad de agua de ríos de la cuenca del Lago de Atitlán 2021. Departamento de Investigación y Calidad Ambiental. https://www.amsclae.gob.gt/wp-content/uploads/2021/12/rios2021.pdf

Rivera, M. (2016).Relación de parámetros fisicoquímicos y presencia de macroinvertebrados para determinar la calidad del agua del río Duero, Michoacán. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. Repositorio del Instituto Politécnico Nacional. http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/24587

Rojas, J. C., Moreno, B., Garralón, G., Plaza, F., Pérez, J., Gómez, M. A. (2008). Potabilization of low NOM reservoir water by ultrafiltration spiral wound membranes. *Journal of hazardous materials,* 158(2-3), 593–598.

Romero-Vargas, M., Bermúdez-Rojas, T., & Duque-Gutiérrez, M. (2020). Evaluación cualitativa de indicadores de sostenibilidad socioambiental para su selección y aplicación en ciudades costarricenses. Revista Geográfica de América Central, (64), 1-25.

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research,* 48(1), 9-26.

Saaty, T.L. (1994). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces*, 24(6),19-43.

Sabino, C. (1996). El proceso de investigación. Caracas: PANAPO.

Sachs, Ignacy (2007), Rumo à ecossocioeconomia: teoria e prática do desenvolvimento. Sao Paulo: Cortez Editora.

Sadat-Noori, S., Ebrahimi, K., & Liaghat, A. (2014). Groundwater quality assessment using the water quality index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. Environmental Earth Sciences, 71, 3827-3843. https://doi.org/10.1007/s12665-013-2770-8

Salou, T., Le Mou¨el, C., van der Werf, H.M.G., (2017). Environmental impacts of dairy system intensification: the functional unit matters. *J. Clean. Prod.,* 140(part 2), 445–454.

Saltelli, A, Ratto, Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M, Tarantola, S. (2008). Global sensitivity analysis: the primer. John Wiley & Sons.

Samboni Ruiz, N. E., Carvajal Escobar, Y., Escobar, J. C. (2007). Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. *Ingeniería e Investigación,* 27(3), 172-181.

Sánchez, A.J., Álvarez, T., Pacheco, G.J., Carrillo, L., & González, A.R. (2016). Calidad del agua subterránea: acuífero sur de Quintana Roo, México. Tecnología y Ciencias del

Agua, 7(4), 75-96. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353549828005

Sánchez Rivero, Marcelino. (2008). Construcción de índices sintéticos de sostenibilidad turística mediante modelos factoriales: aplicación al Sistema Español de Indicadores Ambientales de Turismo. En Las administraciones públicas y empresas turísticas ante el reto de la sostenibilidad. España: Universidad Católica San Antonio de Murcia, Asociación Española de Expertos Científicos en Turismo, AECIT.

Sen, Amartya. (2008). Desenvolvimento como liberdade. São Paulo:Schwarcz.

Serna Mosquera, J. A. (2019). Propuesta de índice de calidad del agua, como herramienta para el desarrollo sustentable en cuerpos de aguas superficiales de la ciudad de Bogotá. Trabajo de grado. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Singh, A. K., Kumar, S., & Sharma, R. K. (2022). Desarrollo y aplicación de un índice de calidad del agua subterránea para evaluar la calidad del agua en el bloque de desarrollo de Bhind, Madhya Pradesh, India. Revista Internacional de Ciencias Ambientales, 48(12), 2258-2270.

Singh, R., Kaur, H., & Singh, A. (2021). Developing a Socio-Environmental Index for Water Quality Assessment in Rural Areas. Environmental Monitoring and Assessment, 193(6), 358. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09159-9

Singha, S., Devatha, C., Singha, S., & Verma, M.K. (2015). Assessing ground water quality using GIS. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 4(11), 689-694. https://doi.org/10.17577/IJERTV4IS110604

Soares, D. (2006). La descentralización en la gestión del agua potable: algunos logros, muchos fracasos y demasiado pendientes. En: La gestión del agua en la cuenca del río Amacuzac: diagnósticos, reflexiones y desafíos. Vargas, S., Guzmán, N. Jiutepec: IMTA, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México.

Sobol, I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and computers in simulation*, 55(1-3), 271-280.

Subba Rao, N., Chaudhary, M. (2019). Hydrogeochemical Processes Regulating the Spatial Distribution of Groundwater Contamination, Using Pollution Index of Groundwater (PIG) and Hierarchical Cluster Analysis (HCA): A Case Study. *Groundwater for Sustainable Development*, 9,1-14.

Swarnee, P.K., Tyagi, A. 2007. Improved method for aggregation of water quality subindices. *Journal of environmental engineering*, 133(2), 220-225.

Terrado, M.; Barceló, D.; Tauler, R.; Borrell, E.; Campos, S.; Barceló, D. (2010). Surface-water-quality indices for the analysis of data generated by automated sampling networks. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 29(1),40 – 52.

Therond, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., Richard, G. (2017). A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 37, 21.

Tischer, V., Farias Espinoza, H., Carvalho Marenzi, R. (2015). Indicadores socioambientales aplicados en la gestión de ambientes costeros. Caso de estudio Santa Catarina, Brasil. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 86,53-66

Tobin, A.; Khan, A.A.; Khan, H.; Moores, L.; Taylor, J. (2007). Forestry Water Quality Index – A planning tool for the assessment and communication of the impacts of forestry activities on water quality. *The Forestry Chronicle*, 83(2),207–214

Torres, P., Cruz, C. H., Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15 Sup. 1),79-94.

Tyson, J.M., M.A. House, (1989). The Application of a Water Quality Index to River Management. *Water Science and Technology*, 21(10-11), 1149-1159

United Nations. (2020). The Sustainable Development Goals Report 2020. United Nations. https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/

Valcarcel Rojas, L., Alberro Macías, N., Frías Fonseca, D. (2020). El índice de calidad de agua como herramienta para la gestión de los recursos hídricos. *Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*, 10(18),1-5.

Valdés, J., Samboni, N. E., Carvajal, Y. (2011). Desarrollo de un indicador de la calidad del agua usando estadística aplicada, caso de estudio: subcuenca Zanjón Oscuro. *Revista Tecno Logicas*, 26, 165-180.

Varol, M., Gökot, B., Blekeyen, A., Sen, B. (2012). Water quality assessment and apportionment of pollution sources of tigris river (turkey) using multivariate statistical techniques—a case study. *River Research and Applications*, 28(9),1428-1438.

Vega, F.J. (2009). Desarrollo y Aplicación de un Índice de Calidad de Agua para ríos en Puerto Rico. Tesis de maestría. Ingeniería civil. Universidad de Puerto Rico. Mayagüez, Puerto Rico.

Videla, M., Schroh, S. (2000). Desarrollo y Uso de Indicadores Ambientales para la Planificación y Toma de Decisiones (Argentina). http://habitat.aq.upm.es/dubai/00/bp757.html

WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos)/ONU-Agua. (2018). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en. Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos. París, UNESCO.

Yaseen Al-Araji, H.K. (2019). Evaluation of physical chemical and biological characteristics of underground wells in Badra City, Iraq. Baghdad Science Journal, 16(3). https://doi.org/10.21123/bsj.2019.16.3.0560

Zafra, C., Temprano, J., Tejero, I. (2017). The physical factors affecting heavy metals accumulated in the sediment deposited on road surfaces in dry weather: A review. *Urban Water Journal*, 14(6).