

Selección de un modelo de producción hídrica idóneo para propósitos de manejo de una cuenca
abastecedora de los andes colombianos, caso de estudio: Cuenca del Río Tona

Jhon Andrew Quintero Cárdenas y Andrés Felipe Rondón Chavarrío

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

PhD. Isabel Cristina Domínguez Rivera

Codirector

PhD. Sandra Rocío Villamizar Amaya

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A nuestras familias y amigos.

Agradecimientos

*A nuestras familias, por ser la fuente inagotable de motivación y el soporte más sólido
ante los desafíos de la vida.*

*A las profesoras Sandra e Isabel, cuya orientación y enseñanzas fueron faros en nuestra
travesía académica, iluminando el camino hacia el conocimiento y la excelencia.*

*A los expertos que generosamente compartieron su conocimiento y experiencia en este
estudio, su participación fue esencial para enriquecer nuestro trabajo.*

*Este proyecto no habría sido posible sin el apoyo y la colaboración de todos ustedes. A
cada uno, nuestro más sincero agradecimiento.*

Tabla de Contenido

Introducción	10
2. Objetivos	12
2.1 Objetivo General	12
2.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Metodología	13
2.1 Identificación y asignación de pesos a los criterios	13
2.2 Caracterización de los modelos de producción hídrica respecto a los criterios de selección identificados.....	15
2.3 Selección del modelo de producción hídrica adecuado	16
3. Resultados	18
3.1 Identificación y asignación de pesos a los criterios	18
3.2 Caracterización de los modelos de producción hídrica respecto a los criterios de selección identificados.....	21
3.3 Selección de un modelo de producción hídrica adecuado	23
4. Conclusiones	29
Referencias Bibliográficas	30
Apéndices.....	35

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Escala de niveles de preferencia	17
Tabla 2. Consolidado de criterios, subcriterios, pesos y definiciones	20
Tabla 3. Caracterización de modelos según subcriterios e indicadores.....	21
Tabla 4. Selección del modelo hidrológico.....	23
Tabla 5. Niveles de preferencia usuarios	25

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Gráficas del método MSE, preferencias entidades vs alternativas	27

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Análisis de consistencia	35
Apéndice B. Matriz agregada	35
Apéndice C. Consistencia subcriterios	36
Apéndice D. Matriz agregada subcriterios.....	40
Apéndice E. Ponderación final de los criterios y subcriterios	41
Apéndice F. Aplicación de la metodología AHP	42
Apéndice G. Modelo elegido, según metodología AHP.....	43
Apéndice H. Selección del modelo según preferencias de los usuarios, usando el método MSE (Mean Square Error 3)	44
Apéndice I. Herramienta usada con los expertos.....	45
Apéndice J. Detalle de la metodología AHP para la ponderación de los criterios y subcriterios..	56
Apéndice K. Tabla de caracterización de criterios y subcriterios.....	62
Apéndice L. Herramienta utilizada para consultar las preferencias de los usuarios.....	63
Apéndice M. Correo agradecimiento a expertos.....	72

Resumen

Título: Selección de un modelo de producción hídrica idóneo para propósitos de manejo de una cuenca abastecedora de los andes colombianos, caso de estudio: Cuenca del Río Tona *

Autor: Jhon Andrew Quintero Cárdenas y Andrés Felipe Rondón Chavarrío **

Palabras Clave: Selección de modelos hidrológicos, análisis multicriterio, AHP, gestión del recurso hídrico.

Descripción: Los modelos de producción hídrica son cada vez más empleados para respaldar la gestión de los recursos naturales por su capacidad de proveer una aproximación simplificada del comportamiento hidrológico de un área de interés. La selección adecuada del modelo es crítica para soportar la toma de decisiones informadas en un contexto global cambiante, de expansión industrial y crecimiento demográfico. Este estudio presenta una estrategia integral para la selección de un modelo de producción hídrica para una cuenca abastecedora (cuenca del río Tona en Santander, Colombia), apoyada en la metodología de análisis multicriterio, Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Las etapas del estudio incluyeron: i) identificación de criterios y subcriterios de selección a partir de revisión bibliográfica y depuración considerando el caso de estudio; ii) ponderación de criterios y subcriterios mediante consulta con expertos en modelación hidrológica y metodología AHP; iii) caracterización de los modelos de interés (SWAT, InVEST y WEAP) en función de los criterios y subcriterios seleccionados; iv) selección del modelo de producción hídrica más adecuado técnicamente aplicando la metodología AHP; y v) selección del modelo considerando las preferencias de usuarios potenciales de este, funcionarios de instituciones encargados de la gestión del agua en la cuenca de interés (CDMB, amb, y municipio de Tona). Se encontró que, el orden de importancia de los criterios fue resolución (0.439), robustez (0.369) y accesibilidad (0.197). Las ponderaciones de los expertos y las características de los modelos, usando AHP resultaron en SWAT como el modelo más idóneo. En contraste, la selección teniendo en cuenta las preferencias de usuarios potenciales de las instituciones resultó en la selección de WEAP. Para los usuarios, usar un modelo que no sea técnicamente el mejor podría suponer un sacrificio leve en la resolución, con un mayor margen de error en las predicciones. Sin embargo, WEAP, junto a su amigable interfaz y su enfoque a la gestión integrada del recurso hídrico, les permitiría comunicar de forma sencilla los escenarios y resultados a partes interesadas y tomadores de decisiones.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: PhD. Isabel Cristina Domínguez Rivera. Codirector: PhD. Sandra Rocío Villamizar Amaya.

Abstract

Title: Selection of a suitable water production model for management purposes of a supply basin of the Colombian Andes, case study: Tona River Basin*

Author(s): Jhon Andrew Quintero Cárdenas and Andrés Felipe Rondón Chavarrío¹

Key Words: Hydrological model selection, multi-criteria analysis, AHP, water resource management.

Description: Water production models are increasingly employed to support natural resource management because of their ability to provide a simplified approximation of the hydrologic behavior of an area of interest. Proper model selection is critical to support informed decision making in a changing global context of industrial expansion and population growth. This study presents a comprehensive strategy for the selection of water production model for a water supply basin (Tona River basin in Santander, Colombia), based on the multi criteria analysis methodology, Analytical Hierarchical Process (AHP). The main stages of the study included: (i) identification of selection criteria and sub-criteria based on literature review and refinement considering the case study; (ii) weighting of criteria and sub-criteria through consultation with experts in hydrological modeling and AHP methodology; (iii) characterization of the models of interest (SWAT, InVEST and WEAP) based on the selected criteria and sub-criteria; iv) selection of the most technically adequate water production model by applying the AHP methodology; and v) selection of the model considering the preferences of potential model users, officials of institutions in charge of water management in the basin of interest (CDMB, amb, and municipality of Tona). It was found that the order of importance of the criteria was resolution (0.439), robustness (0.369), and accessibility (0.197). Expert weightings and model characteristics using AHP resulted in SWAT as the most suitable model. In contrast, the selection considering the preferences of potential users of the institutions resulted in the selection of WEAP. For users, using a model that is not technically the best could mean a slight sacrifice in resolution, with a greater margin of error in predictions. However, WEAP, along with its user-friendly interface and approach to integrated water resource management, would allow them to easily communicate scenarios and results to stakeholders and decision makers.

* Degree Work

¹ Faculty of Physicomechanics. School of Civil Engineering. Civil Engineering. Director: PhD. Isabel Cristina Domínguez Rivera. Co-director: PhD. Sandra Rocío Villamizar Amaya.

Introducción

El contexto global actual de crecimiento poblacional, urbanización, intensificación de la agricultura y cambio climático hace que la gestión integral del recurso hídrico sea una herramienta fundamental para buscar el desarrollo sostenible de las naciones (Paul et al., 2021; Thakuri & Wijesekera, 2021). La capacidad de manejo adecuado del recurso hídrico marca una distinción clave entre países desarrollados y aquellos en desarrollo (Paul et al., 2021) pues garantiza el acceso a agua potable -un derecho humano esencial-, e impacta de forma directa en la producción de alimentos, la generación de energía, la conservación de ecosistemas y calidad de vida de las comunidades (Molden, 2013). Colombia, con su abundancia en recursos hídricos y diversidad geográfica, se enfrenta a esta compleja tarea, y es que, a pesar de los esfuerzos realizados en pro de la gestión hídrica (Ministerio de Ambiente et al., 2010), aún existen zonas donde hay desconocimiento de la oferta hídrica actual y muchas otras donde no se ha logrado cobertura de abastecimiento de agua para todos los habitantes (Arango Ruiz, 2013).

Ante esta incertidumbre se hace necesario implementar algún sistema que permita gestionar el recurso hídrico y apoye la toma de decisiones informadas (Richey et al., 2015; Thakuri & Wijesekera, 2021). Las herramientas de modelación de la producción hídrica han demostrado ser útiles para cumplir este objetivo, pues desempeñan un papel esencial al proporcionar una representación conceptual y matemática de la dinámica hidrológica de una cuenca (Cabrera, 2012).

De este modo, es claro que para actores relevantes de una región (municipios, autoridades ambientales 4, entidades prestadoras de servicios, etc.) es de vital importancia la implementación de modelos hidrológicos apropiados que les permitan atender no solo las disposiciones legales del país, sino permitir una toma de decisiones informada que propenda por una gestión eficiente de

los recursos. En el caso de la microcuenca del río Tona, que es estratégica para el abastecimiento de la población metropolitana del área metropolitana de Bucaramanga (Santander, Colombia), se requiere estimar la producción hídrica a través de un ejercicio de modelación que permita conocer la cantidad de agua que se puede utilizar de manera sostenible para abastecer al acueducto metropolitano de Bucaramanga y otros usuarios de la cuenca, así como para planificar medidas de conservación y manejo adecuado del recurso hídrico, considerando factores como la variabilidad climática y las actividades humanas en la zona (CDMB, 2006).

Dentro del amplio abanico de herramientas disponibles para la modelación de la producción hídrica (Ghonchepour et al., 2021; Paul et al., 2021), tres han sido implementadas recientemente en la microcuenca del río Tona: Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Carrillo, 2018), Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-Offs (InVEST) (Arenas & Ordóñez, 2022) y Water Evaluation and Planning System (WEAP) (Anteliz & Marín, 2022). Cada una de estas herramientas presenta características distintivas en términos de información requerida, estimativos y enfoque de respuesta (Heaps et al., 2012; Uribe, 2010; Xu, 2002) y es necesario determinar cuál de las tres herramientas puede ser más recomendable para su implementación dentro de las instituciones que tienen influencia en el área de estudio, teniendo en cuenta que no solo los aspectos técnicos del modelo son relevantes para la toma de decisión, sino también los intereses y capacidades técnicas y humanas de dichas entidades, de tal manera que se garantice el uso del modelo en el tiempo.

De acuerdo con el planteamiento anterior, surge el interrogante: ¿cuál es el modelo de producción hídrica más adecuado para efectos de manejo de la cuenca del río Tona? Para contribuir a responder este interrogante, este proyecto implementó una metodología multicriterio que apoye la selección del modelo más adecuado para la estimación de la producción hídrica en la cuenca del

río Tona en Santander. Esta metodología resultó útil debido a su amplia aplicación en proyectos enmarcados en la selección de modelos y también en aquellos que involucren los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Martínez Gutiérrez, 2014; Sánchez et al., 2004; Tuo et al., 2015). La relevancia del resultado de este estudio radicó en proporcionar una estrategia de modelación de la producción hídrica que apoye la toma de decisiones por parte de los actores de la cuenca, teniendo en cuenta sus recursos y necesidades.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Seleccionar un modelo de producción hídrica idóneo para efectos de toma de decisiones en una cuenca abastecedora de los Andes colombianos.

2.2 Objetivos Específicos

Identificar los criterios necesarios para realizar la selección del modelo de producción hídrica.

Caracterizar los modelos de producción hídrica SWAT, InVEST y WEAP respecto a dichos criterios.

Aplicar la metodología multicriterio para la selección del modelo de producción hídrica adecuado para propósitos de manejo de la cuenca abastecedora del área metropolitana de Bucaramanga

2. Metodología

Este estudio se desarrolló en tres fases, como se describe en las siguientes secciones.

2.1 Identificación y asignación de pesos a los criterios

Se llevó a cabo una revisión de literatura con el objetivo de identificar los criterios necesarios para la selección del modelo de producción hídrica adecuado para efectos de manejo de la cuenca del río Tona. Para ello, se utilizó una combinación de palabras clave relacionadas con el tema, como "hydrological modelling", "model selection", "classification", "criteria" y "water management", empleando las bases de datos de Scopus, Google Scholar y Web of Science. Los documentos encontrados a partir de esta revisión se filtraron y seleccionaron según su título, resumen y contenido, y se construyó una tabla en Microsoft Excel® donde se procesaron los artículos, organizándolos en celdas que contenían información asociada a los criterios más relevantes y aplicables al caso de estudio, incluyendo aspectos económicos, ambientales, sociales, técnicos y operativos (Boorman et al., 2007; Thakuri & Wijesekera, 2021; Tuo et al., 2015).

En una segunda instancia, se identificaron y fusionaron los criterios cuyo nombre o significado resultaba redundante o representaban el mismo concepto. También se obviaron criterios que fueran comunes para los tres modelos. Luego, en distintas sesiones se discutió, junto a una experta en el área del modelado en producción hídrica, el modo de depurar y concretar los que, finalmente, fueron los criterios más representativos para este caso de estudio, agrupándolos en criterios y subcriterios. Una vez obtenida la lista consolidada de criterios y subcriterios, se procedió a definir clara y concisamente cada uno de ellos, con base en lo consignado en la literatura (Paul et al., 2021; Thakuri & Wijesekera, 2021; Tuo et al., 2015).

Para la asignación de pesos a los criterios y subcriterios consolidados, se usó la metodología del AHP (Analytic Hierarchy Process) (Saaty, 1994), que involucró la consulta a expertos mediante una encuesta semiestructurada. La selección de estos expertos se basó en su desempeño en el área de modelación hídrica, logros académicos y profesionales, asegurando así la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos. Cada experto fue contactado a través de correo electrónico, donde se les proporcionó una explicación del proyecto, así como la invitación a participar; se adjuntó una encuesta desarrollada en Google Forms que contenía un resumen introductorio del proyecto, un consentimiento informado, información relevante para la valoración por pares entre criterios y subcriterios (adjunto también en el correo en formato PDF), y finalmente, el formulario para la comparación por pares (ver **Apéndice I**).

Para procesar los datos obtenidos de las encuestas, se utilizó Microsoft Excel®. Allí, se organizaron las respuestas de cada experto en matrices de comparación y se halló la consistencia de los juicios, usando el radio de consistencia (CR). Para una matriz de 3x3, la consistencia es aceptable si el radio de consistencia es menor al 5%, mientras que para una matriz de 4x4, debe ser inferior al 9% (Saaty, 2001). Por tanto, fueron descartados aquellos juicios que resultaron inconsistentes y se obtuvo una matriz agregada, es decir, se agregó la comparación por pares de cada experto cuyos juicios fueron consistentes, como una media geométrica ponderada (Basak & Saaty, 1993).

Luego, una vez que todas las matrices de comparación por pares se generaron por agregación, se utilizó el método de vectores propios aproximados para calcular los pesos o prioridades finales para cada criterio y subcriterio consolidados para este estudio (**Basak & Saaty, 1993**) (ver **Apéndice J**).

Los resultados del ejercicio fueron compartidos a los expertos mediante correo electrónico, adjuntando el árbol de jerarquía con los respectivos pesos ponderados (ver **Apéndice M**).

2.2 Caracterización de los modelos de producción hídrica respecto a los criterios de selección identificados.

Bajo revisión exhaustiva, se realizó una evaluación detallada de cada modelo de producción hídrica (SWAT, InVEST y WEAP) en función de los criterios finales definidos para este estudio, la cual se centró en recopilar aspectos fundamentales de cada modelo como los procesos hidrológicos y escenarios que modelan, la disponibilidad de información de apoyo y servicios de soporte que brindan sus desarrolladores, así como el nivel de recursos humanos y técnicos requeridos para su implementación. Este proceso se soportó en fuentes de información como estudios que utilizaron los modelos en cuestión, documentación oficial, manuales de usuario y consulta a un experto (Arroyo et al., 2010; Mugatsia, 2010; Sánchez-Canales et al., 2012; Sieber, 2006; Uribe, 2010; Yamini Priya & Manjula, 2021).

Para organizar de forma efectiva esta información, se empleó Microsoft Excel®. Allí, se dispuso un cuadro comparativo donde las filas correspondían a los criterios de selección previamente definidos, mientras que las columnas fueron destinadas a cada uno de los modelos en estudio (Ghonchepour et al., 2021; Kampf & Burges, 2007; Paul et al., 2021). En adición, algunos criterios se desglosaron en un formato de lista de chequeo, para evaluar la capacidad de cada modelo para analizar o modelar ciertos procesos hidrológicos y escenarios específicos (Tuo et al., 2015).

2.3 Selección del modelo de producción hídrica adecuado

Inicialmente, utilizando los indicadores obtenidos de la fase 2, se aplicó la metodología de análisis multicriterio AHP concebida por Thomas Saaty (1994) para determinar el modelo de producción hídrica más adecuado. Esto se realizó mediante matrices de comparación, donde se enfrentaban los modelos (SWAT, InVEST y WEAP) de acuerdo con cada subcriterio. Posteriormente, se obtuvo una matriz normalizada y un vector promedio para cada matriz de comparación. Dado que los subcriterios definen a los criterios, estos datos se utilizaron para calcular una priorización interna, obtenida como la suma-producto del vector promedio y los pesos de cada subcriterio. Para calcular la priorización global, se realizó la suma-producto de la priorización interna y el peso ponderado de cada criterio (Saaty, 1994). De ese modo, se obtuvo una selección del modelo de producción hídrica.

En una segunda parte, se llevaron a cabo reuniones con potenciales usuarios de los modelos de cada una de las entidades competentes en el manejo del recurso hídrico en la cuenca del Río Tona. Estas entidades fueron la Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb) y la Alcaldía de Tona. Se realizaron reuniones con representantes de cada entidad, las cuales fueron concertadas mediante llamadas telefónicas y correos electrónicos, solicitando la participación de cada usuario en la investigación. El propósito fundamental de estas reuniones fue que cada usuario potencial evaluara el nivel de preferencia de cada criterio en relación con el desempeño de los modelos, teniendo en cuenta los recursos y necesidades de su institución. En la reunión se les presentó un formulario que contenía un resumen introductorio del proyecto, un consentimiento informado, información relevante para la valoración de preferencias y finalmente las tablas donde cada representante expresaría su nivel de preferencia y la justificación de su elección (ver **Apéndice L**). La **Tabla 1**. muestra la escala

de niveles de preferencias (1-5) usada en la herramienta, adaptada de la escala propuesta por Saaty (Saaty, 1994).

Tabla 1.

Escala de niveles de preferencia

Puntuación	Nivel de preferencia	Definición
5	Preferencia muy alta	Muy importante
4	Preferencia alta	Bastante importante
3	Preferencia media	Ni importante ni no importante
2	Preferencia baja	Poco importante
1	Preferencia muy baja	No es importante

Nota. Esta tabla representa la escala para expresar de manera cuantitativa la importancia relativa de diferente elementos o criterios en la toma de decisiones. Adaptado de “Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world”, por Thomas Saaty, 2001, RWS publications.

Con los resultados de las encuestas, se aplicó el método estadístico del Error Cuadrático Medio (MSE), el cual consiste en un estimador que mide el promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre lo que se desea obtener y lo que se tiene, un valor de MSE más cercano a cero indica un ajuste óptimo entre ambos conjuntos de datos (Cabrera, 2012a). El análisis del MSE se aplicó entre el rendimiento de los modelos por subcriterio, obtenido de la caracterización de estos en base a los criterios y subcriterios elegidos para este estudio, y las preferencias

expresadas por los usuarios participantes, para así evaluar cuál de los tres modelos (SWAT, InVEST o WEAP) se ajustaba más a las preferencias expresadas por los usuarios. Esto se realizó para validar la idoneidad del modelo seleccionado mediante la metodología AHP.

3. Resultados

3.1 Identificación y asignación de pesos a los criterios

A partir de la revisión de literatura, se identificaron 63 criterios asociados a la selección de modelos de producción hídrica. Tras la primera fase de depuración, el número de criterios se redujo a 32. Finalmente, mediante sesiones de discusión y consenso, enfocadas en la pertinencia de los criterios para el caso de estudio, se consolidó una lista definitiva de 3 criterios y 9 subcriterios. Se consultó a 15 expertos para realizar la comparación por pares de criterios y subcriterios, de los cuales nueve respondieron la encuesta y fueron seis cuyas comparaciones resultaron en juicios consistentes. En la **Tabla 2.** se presentan los resultados de la ponderación de los criterios y subcriterios.

En los marcos de selección de modelos de producción hídrica, se reconoce la necesidad de definir criterios, y es que, elegir un modelo es una cuestión de adaptarse a las necesidades. Algunos estudios basan la selección del modelo de producción hídrica en revisiones exhaustivas de modelos hidrológicos representativos (Ghonchepour et al., 2021; Kampf & Burges, 2007; Paul et al., 2021; Sánchez et al., 2004). Por otra parte, investigaciones similares al presente estudio (Nesru, 2023; Tuo et al., 2015) optan por el análisis multicriterio (AMC), que permite tomar en cuenta varios factores de forma simultánea.

Uno de los resultados más sobresalientes fue el alto peso asignado al criterio 1: C.1 Resolución. Con una ponderación de 0.434, este criterio engloba la capacidad del modelo para capturar la exactitud y el detalle espacial y temporal de los procesos hidrológicos; su alto peso evidencia la importancia de la resolución espacial y temporal en las prácticas de modelación de la producción hídrica, pues aquellos modelos con una alta resolución pueden proporcionar información con mayor fidelidad sobre las dinámicas de las cuencas hidrográficas. No obstante, es importante recordar que una alta resolución también supone un incremento de la complejidad computacional y la exigencia de la cantidad y calidad de datos requeridos para el modelamiento (Cabrera, 2012b; Xu, 2002).

Por su parte, el criterio 2: C.2. Robustez, con una ponderación de 0.369, también da cuenta del interés por parte de los expertos de que el modelo pueda, no solo, caracterizar adecuadamente los procesos naturales del ciclo hidrológico sino también dar información sobre la incertidumbre de los estimativos e incorporar variaciones de los datos, un aspecto fundamental en contextos de cambio climático y condiciones hidrológicas altamente variables (Kampf & Burges, 2007; Paul et al., 2021).

Del mismo modo, la baja ponderación del criterio 3: C.3. Accesibilidad, sugiere que, para aquellos usuarios con mayor experiencia en el campo de la modelación de la producción hídrica, aspectos como la precisión de los resultados del modelo y su capacidad para abordar distintas condiciones hidrológicas, son preponderantes. Por otra parte, un resultado inesperado ha ocurrido en la ponderación interna relacionada con este criterio, pues la disponibilidad del código ha resultado ser el criterio con menor relevancia dentro de la Accesibilidad; esto va en contraste con otros estudios donde la accesibilidad al código es considerada como uno de los principales criterios para selección de un modelo de producción hídrica (Boorman et al., 2007; Paul et al., 2021).

Cabe resaltar que, aunque en la gran mayoría de estudios de selección de modelos de producción hídrica, la disponibilidad de datos es un criterio crucial (Ghonchepour et al., 2021; Kampf & Burges, 2007; Paul et al., 2021; Sánchez et al., 2004; Tuo et al., 2015), en el presente estudio este factor no se tuvo en consideración dado que ya se contaba con los resultados (por lo tanto, con la disponibilidad de datos) de cada modelo en consideración (SWAT, InVEST y WEAP) (Anteliz & Marín, 2022; Arenas & Ordóñez, 2022; Carrillo, 2018)

Tabla 2.

Consolidado de criterios, subcriterios, pesos y definiciones

	Criterio/subcriterio	Abreviatura	Peso	Definición
C1	Resolución	RES	0.434	Capacidad del modelo de producción hídrica para capturar y representar adecuadamente la exactitud, así como el detalle espacial y temporal de los procesos hidrológicos.
C1.1	Discretización espacial usada por el modelo	DE	0.495	Resolución o tamaño de la mínima unidad utilizada por el modelo para representar la cuenca hidrográfica. Una mayor discretización espacial puede proporcionar mayor detalle, pero puede requerir más datos desconocidos en el sitio de estudio y aumentar la complejidad computacional.
C1.2	Resolución temporal mínima de salida	RT	0.505	Intervalo o frecuencia de los datos de salida del modelo (diaria, semanal, mensual, anual).
C2	Robustez	ROB	0.369	Capacidad del modelo de producción hídrica para manejar diferentes condiciones y escenarios hidrológicos de manera efectiva y consistente, incluyendo variaciones en los datos, incertidumbres y condiciones extremas.
C2.1	Estrategia de calibración	EC	0.343	Herramienta o mecanismo utilizado para ajustar los parámetros del modelo y obtener una mejor correspondencia entre las salidas del modelo y los datos observados (automática, semiautomática, manual).
C2.2	Procesos naturales modelados	PN	0.443	Componentes del ciclo hidrológico modelados (precipitación, evapotranspiración, escorrentía, entre otros).
C2.3	Análisis de escenarios	AE	0.213	Posibilidad del modelo de producción hídrica de simular escenarios futuros, incorporar procesos antrópicos relevantes como la gestión del agua (oferta y demanda) y prácticas agrícolas, el impacto de infraestructuras humanas (represas, canales de riego, etc.), y otros factores antrópicos que puedan afectar el sistema hídrico de la cuenca.
C3	Accesibilidad	ACC	0.197	Facilidad de uso del programa, incluyendo una interfaz intuitiva, documentación clara y aprendizaje rápido, para permitir que un amplio rango de usuarios pueda utilizarlo de manera efectiva.
C3.1	Disponibilidad de código	DC	0.184	Accesibilidad del código del software (abierto, disponible por solicitud, sólo ejecutable).
C3.2	Soporte	SP	0.374	Disponibilidad de elementos como documentación (manual de referencia, guía de usuario, manual de aplicaciones), canales de asistencia al usuario, una base de conocimientos actualizada y acceso a una línea directa de soporte técnico o chat en vivo,

Criterio/subcriterio	Abreviatura	Peso	Definición
C3.3 Recursos humanos y técnicos	RH	0.238	actualizaciones periódicas, parches de seguridad y una comunidad activa de usuarios para intercambiar ideas y solucionar problemas. Nivel de conocimiento y habilidades técnicas necesarias para operar y utilizar efectivamente el modelo, esto incorporado a una interfaz gráfica amigable.
C3.4 Nivel de postprocesamiento	NP	0.204	Evalúa el grado de procesamiento adicional necesario para obtener resultados finales interpretables y listos para su aplicación. Algunos modelos pueden requerir un mayor nivel de postprocesamiento, lo que puede implicar más tiempo y esfuerzo por parte del usuario.

Nota. Esta tabla muestra el consolidado de criterios y subcriterios con sus respectivos pesos.

3.2 Caracterización de los modelos de producción hídrica respecto a los criterios de selección identificados

A partir de la caracterización de los modelos, de acuerdo con los criterios seleccionados, los resultados revelan que SWAT se destaca por su resolución temporal precisa y amplia gama de procesos modelados, lo que lo hace adecuado para estudios detallados a cualquier escala. Sin embargo, SWAT presenta una alta exigencia de recursos humanos y técnicos. InVEST y WEAP son opciones viables para estudios con menor requerimiento de precisión en los procesos modelados y los resultados obtenidos, con InVEST destacando en discretización espacial, disponibilidad de código abierto y bajos requerimientos de postprocesamiento de resultados, y WEAP resaltando en el análisis de escenarios y bajos requerimientos de postprocesamiento para obtener resultados finales.

Así entonces, la **Tabla 3.** sintetiza la caracterización de los modelos, utilizando valores indicadores en escala de 1 a 5, según se definen en la columna Definición de la Escala.

Tabla 3.

Caracterización de modelos según subcriterios e indicadores

Criterio	Definición de la escala	SWAT	INVEST	WEAP
C.1 Resolución	C1.1 Discretización espacial usada por el modelo	5 mayor discretización y 1 menor discretización. HRU (Unidad de Respuesta Hidrológica)	3 Píxel	5 Subcuenca
				1

	C1.2	Resolución temporal mínima de salida	5 resolución más precisa y 1 una menos precisa	Diarias, mensuales, anuales	5	Mensuales, anuales	3	Mensuales, anuales	3
C.2 Robustez	C2.1	Estrategia de calibración	5 estrategias de calibración robustas y 1 estrategias de calibración manuales	Automática	5	Manual	1	Semiautomática	3
	C2.2	Procesos naturales modelados	5 corresponde a 5 procesos más relevantes modelados y 1 ningún proceso modelado	Precipitaciones	✓	✓		✓	
				Escorrentía superficial	✓	✓		✓	
				Infiltración	✓	5	✓	4	4
				Evapotranspiración	✓	✓		✓	
				Flujo de aguas subterráneas	✓			✓	
	C2.3	Análisis de escenarios	5 corresponde a 6 escenarios más relevantes modelados y 1 ningún escenario modelado	Prácticas agrícolas	✓			✓	
				Uso de suelos	✓	✓		✓	
				Climas futuros	✓	5	✓	2,5	5
				Infraestructura	✓			✓	
				Oferta y demanda	✓			✓	
				Operaciones	✓	✓		✓	
C.3 Accesibilidad	C3.1	Disponibilidad de código	5 código abierto y 1 solo ejecutable	Código abierto	5	Código abierto	5	Sólo ejecutable (modificable mediante API)	2
	C3.2	Soporte	5 soporte alto y 1 soporte bajo	Alto	5	Bajo-Medio	2	Medio-alto	3
	C3.3	Recursos humanos y técnicos	5 requiere un bajo nivel de formación y 1 requiere un alto nivel de formación	Alto	1	Medio	3	Medio-alto	4
	C3.4	Nivel de postprocesamiento	5 un nivel de post procesamiento bajo y 1 un nivel de post procesamiento alto	Medio	3	Medio-bajo	4	Bajo	5

Nota. Esta tabla muestra la caracterización de los modelos respecto a los subcriterios, utilizando indicadores. En el **Apéndice K** se incluye una versión extendida con la definición del desempeño de los modelos, de acuerdo con cada subcriterio.

3.3 Selección de un modelo de producción hídrica adecuado

En esta fase se llevó a cabo la selección final del modelo de producción hídrica más idóneo para la gestión de la Cuenca del Río Tona. Esta elección se basó en una metodología sólida que incluyó la ponderación de criterios identificados en la fase 1 y la evaluación detallada de modelos en la fase 2. El análisis jerárquico de procesos (AHP) desempeñó un papel fundamental al asignar pesos a los criterios, reflejando así su importancia relativa en la toma de decisiones. Tras una revisión exhaustiva de los resultados obtenidos en la fase 2, donde se evaluaron los modelos SWAT, InVEST y WEAP en función de estos criterios, es evidente que SWAT emerge como el modelo de producción hídrica ganador. Esta elección se sustenta en su destacado desempeño en aspectos críticos, como alta resolución espacial, capacidad para modelar una amplia gama de procesos naturales y la posibilidad de realizar análisis de escenarios detallados (Arroyo et al., 2010). A pesar de limitaciones de SWAT como la gran cantidad de datos necesarios para obtener resultados precisos, el alto requerimiento de recursos humanos y técnicos para su uso y la necesidad de un elevado post procesamiento de los datos de salida, la aplicación de la metodología AHP lo señaló como el ganador (ver **Apéndice A al H**), aunque no por una ventaja muy amplia con respecto al modelo InVEST, como se muestra en la

Tabla 4.

Tabla 4.

Selección del modelo hidrológico

Criterio	RES	ROB	ACC	Priorización
SWAT	0.395	0.469	0.362	0.413
InVEST	0.413	0.244	0.338	0.337
WEAP	0.193	0.287	0.299	0.250

Ponderación	0.424	0.350	0.227	1.000
global				

Nota. Esta tabla muestra el resultado de la aplicación de la metodología AHP, donde se obtuvo un modelo adecuado según aspectos técnicos. RES = Resolución; ROB = Robustez; ACC = Accesibilidad.

El modelo SWAT emerge como la opción técnica más recomendable para llevar a cabo la gestión sostenible de la Cuenca del Río Tona. Este resultado es concordante con investigaciones previas que han utilizado con éxito este modelo en estudios hidrológicos similares. Estos estudios anteriores han demostrado que SWAT es una herramienta confiable y efectiva para abordar los desafíos de gestión hídrica en cuencas con característica semejantes. Los resultados favorables obtenidos en investigaciones previas fortalecen aún más la elección de SWAT en este contexto, resaltando su capacidad para proporcionar resultados precisos y aplicables en la gestión sostenible de los recursos hídricos en la Cuenca del Río Tona (Arroyo et al., 2010).

Selección del modelo considerando las preferencias de los actores de la microcuenca del Tona

Para enriquecer aún más el proceso de selección y asegurarnos de que el modelo seleccionado se alinee con las necesidades y preferencias de los usuarios reales se aplicó el método estadístico del error cuadrático medio (MSE) (Cabrera, 2012a). Siguiendo esta premisa, y con la información obtenida de las encuestas (Tabla 5) y los indicadores característicos de cada modelo, se obtuvo como resultado que WEAP se alineaba de manera más consistente con las preferencias expresadas, en comparación a los otros modelos. Esto sugiere que, si bien SWAT destacó en términos técnicos y de resolución, WEAP logra una mayor concordancia con las

necesidades y capacidades actuales de las instituciones expresadas por los usuarios finales (amb, CDMB y el municipio de Tona).

Tabla 5.

Niveles de preferencia usuarios

Criterio/subcriterio		AMB	TONA	CDMB
C1	RES	5	4	4
C1.1	DE	2	4	3
C1.2	RT	4	3	3
C2	ROB	3	5	3
C2.1	EC	3	4	4
C2.2	PN	3	3	4
C2.3	AE	3	4	4
C3	ACC	5	5	4
C3.1	DC	1	1	5
C3.2	SP	4	3	5
C3.3	RH	5	5	5
C3.4	NP	5	5	5

Nota. Esta tabla muestra el nivel de preferencia frente a cada criterio/subcriterio, expresado por los usuarios finales del modelo. RES = Resolución; DE = Discretización espacial usada por el modelo; RT = Resolución temporal mínima de salida; ROB = Robustez; EC = Estrategia de calibración; PN = Procesos naturales modelados; AE = Análisis de escenarios; ACC = Accesibilidad; DC = Disponibilidad de código; SP = Soporte; RH = Recursos humanos y técnicos; NP = Nivel de postprocesamiento.

Si bien, las ponderaciones de los expertos asignaron un peso específico a criterios y subcriterios, cada entidad definió sus preferencias teniendo en cuenta factores importantes como las necesidades propias y la facilidad de proveer a un modelo la información necesaria para su ejecución, información que en algunos de los casos es poco accesible o las fuentes no son del todo confiables. Por lo tanto, aunque existen factores que según los expertos son relevantes a la hora de seleccionar un modelo de producción hídrica, los resultados obtenidos de las preferencias de los funcionarios de las instituciones ponen de manifiesto que no siempre se cuenta con la información necesaria o el equipo humano y técnico para ejecutar el mejor modelo.

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb) que tiene una alta importancia en la gestión del agua para el abastecimiento de la población del área metropolitana de Bucaramanga y la Alcaldía de Tona que también tiene intereses en la gestión local de la cuenca, priorizaron la accesibilidad, y la resolución. La Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), entidad encargada de la gestión ambiental y de recursos hídricos en la región, enfatiza además el acceso al código fuente y el soporte técnico.

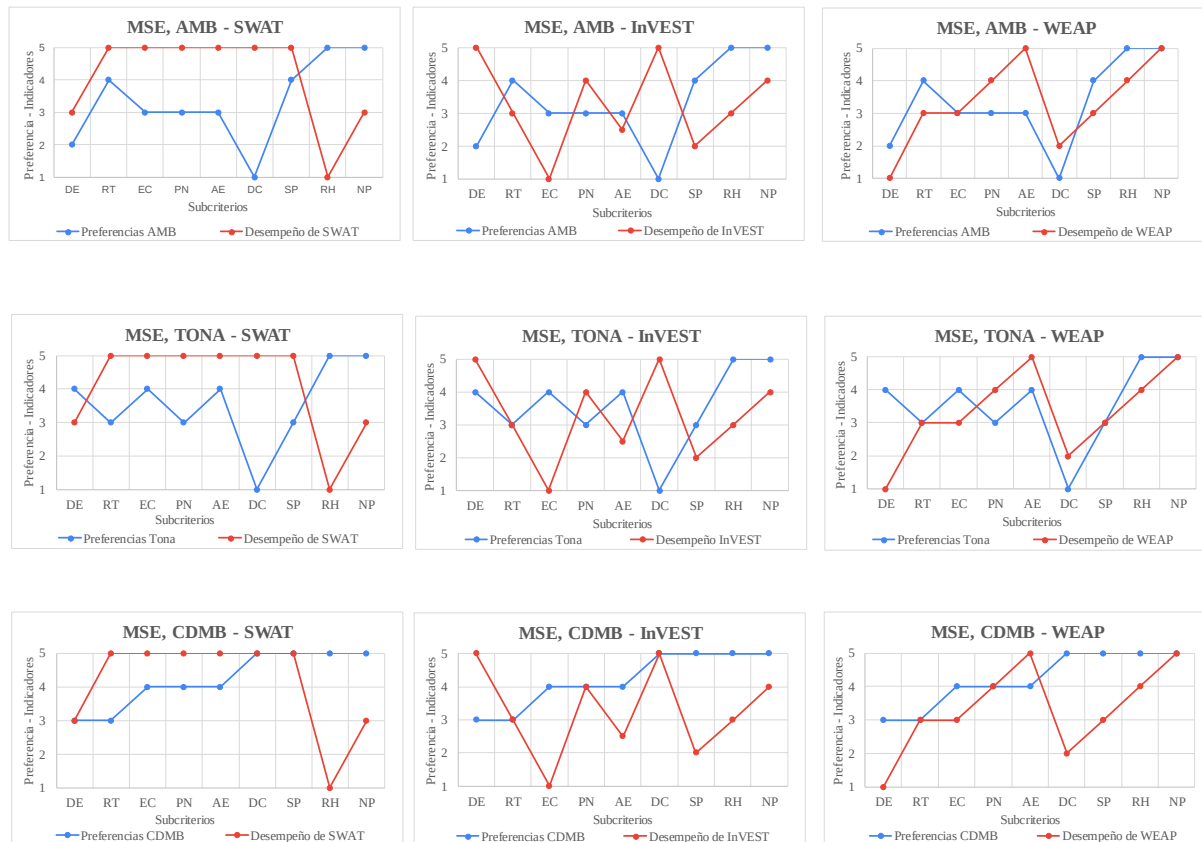
Los resultados obtenidos de la aplicación del método MSE se pueden apreciar mejor gráficamente, como se muestra en la **Figura 1** donde, en el eje “y” se presenta la escala de 1-5 que corresponde a: i) el nivel de preferencia respecto a los subcriterios mostrado por los usuarios (línea azul), y ii) el desempeño de los modelos de producción hídrica respecto a los subcriterios (línea roja). En el eje “x” se encuentran dichos subcriterios. La cercanía entre los puntos que componen cada línea supone un mejor ajuste del desempeño del modelo a las preferencias del usuario evaluado, respectivamente. Por tanto, se hace evidente que WEAP se ajusta más a las preferencias de los usuarios, en comparación al ajuste mostrado por los modelos SWAT e InVEST.

Optar por WEAP como el modelo más idóneo para los usuarios, podría suponer un leve sacrificio de la resolución en la representación hidrológica, lo que podría afectar las predicciones, resultando en una asignación menos eficiente del recurso hídrico. No obstante, estudios previos (Haddad et al., 2007; Léville et al., 2003) dan cuenta de la eficacia de WEAP en la gestión y planificación de recursos hídricos, destacando su capacidad para adaptarse a diferentes contextos y necesidades, una característica clave para apoyar la toma de decisiones informada (Thakuri & Wijesekera, 2021). En adición, WEAP resulta más accesible en términos de formación lo que indica que puede ser una opción sólida cuando se cuentan con recursos técnicos y humanos limitados.

Se plantea entonces una estrategia de enfoque incremental que permita hacer una transición de un modelo que puede ser más accesible pero técnicamente menos preciso, como WEAP, a uno que es más robusto y preciso, como SWAT. Este enfoque permite a las instituciones iniciar con un modelo que se ajusta a sus recursos y necesidades actuales, brindando una base sólida para la gestión del agua. A medida que se adquieren más recursos técnicos, información y se acumula experiencia, las instituciones pueden considerar la transición hacia un modelo más completo, como SWAT, que ofrece una visión más detallada y precisa de los comportamientos hidrológicos. Esta transición gradual puede apoyar a las instituciones a mejorar su capacidad de toma de decisiones a lo largo del tiempo, alineando sus prácticas con los estándares técnicos más altos y adaptándose a las realidades locales.

Figura 1.

Gráficas del método MSE, preferencias entidades vs alternativas



Nota. Las gráficas representan el nivel de ajuste de las preferencias de los usuarios al desempeño de cada modelo. RES = Resolución; DE = Discretización espacial usada por el modelo; RT = Resolución temporal mínima de salida; ROB = Robustez; EC = Estrategia de calibración; PN = Procesos naturales modelados; AE = Análisis de escenarios; ACC = Accesibilidad; DC = Disponibilidad de código; SP = Soporte; RH = Recursos humanos y técnicos; NP = Nivel de postprocesamiento.

4. Conclusiones

Para estudios encaminados a la selección de un modelo producción hídrica, el proceso de identificar, depurar, consolidar y ponderar criterios proporciona una base sólida y transparente. En adición, la consulta a expertos es una práctica común en los procesos de análisis multicriterio (AMC), dado que permite incorporar la experticia y conocimiento especializado en la toma de decisiones. Al adoptar esta metodología, se establece un camino estructurado para abordar la complejidad de la selección de modelos de producción hídrica, donde múltiples variables y consideraciones están en juego.

La evaluación de estos modelos de producción hídrica ha destacado que SWAT sobresale en resolución temporal y procesos modelados, pero su requerimiento de información podría limitar su aplicabilidad en contextos con recursos limitados. Por otro lado, InVEST destaca en discretización espacial y código abierto, mientras que WEAP sobresale en accesibilidad, baja necesidad de post procesamiento de datos y buen soporte técnico.

Esta investigación plantea un desafío interesante en la toma de decisiones, ya que la elección inicial basada en la metodología AHP y la preferencia de los usuarios respaldada por el método ECM (Error Cuadrático Medio) divergen. Esto pudo deberse a que, por lo general, en la metodología AHP, los expertos que ponderan los criterios también brindan las preferencias. En última instancia, la elección entre SWAT y WEAP dependerá de cómo se equilibren las consideraciones técnicas y las preferencias prácticas en la gestión hídrica de la Cuenca del Río Tona. Esto destaca la importancia de una colaboración continua entre investigadores y usuarios reales para lograr una gestión hídrica efectiva y sostenible, que sea capaz de abordar tanto los aspectos técnicos como las necesidades locales en constante evolución.

Referencias Bibliográficas

- Anteliz, Y., & Marín, A. (2022). Análisis de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico en una cuenca estratégica abastecedora mediante la herramienta WEAP. *Revista UIS Ingenierías*. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias>
- Arango Ruiz, Á. (2013). Crisis mundial del agua. *Producción + Limpia*, 8, 7–8.

- Arenas, D., & Ordóñez, O. (2022). Análisis de la usabilidad del módulo de producción hídrica de InVEST como herramienta de planificación en una cuenca estratégica de los andes colombianos. *Revistas UIS Ingenierías*.
- Arroyo, L., Heidinger, H., & Araya, E. J. (2010). Modelo Hidrológico SWAT como herramienta para procesos de toma de decisión. *Documento Tecnico Nx*, 14.
- Basak, I., & Saaty, T. (1993). Group decision making using the analytic hierarchy process. *Mathematical and Computer Modelling*, 17(4), 101–109.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0895-7177\(93\)90179-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0895-7177(93)90179-3)
- Boorman, D. B., Williams, R. J., Hutchins, M. G., Penning, E., Groot, S., & Icke, J. (2007). A model selection protocol to support the use of models for water management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(1), 634–646.
- Cabrera, J. (2012a). Calibración de modelos hidrológicos. *Instituto Para La Mitigación de Los Efectos Del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*.
- Cabrera, J. (2012b). Modelos hidrológicos. *Instituto Para La Mitigación de Los Efectos Del Fenómeno El Ni-o, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*, 8.
- Carrillo, G. (2018). *Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT*.
- CDMB. (2006). *PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE LA SUBCUENCA RÍO SURATÁ*.

- Ministerio de Ambiente, V. y D. T., Posada, C. C., & Cuadros, C. A. (2010). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. Imprenta Nacional de Colombia.
- Ghonchepour, D., Sadoddin, A., Bahremand, A., Croke, B., Jakeman, A., & Salmanmahiny, A. (2021). A methodological framework for the hydrological model selection process in water resource management projects. *Natural Resource Modeling*, 34(3), e12326. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/nrm.12326>
- Haddad, M., Jayousi, A., & Hantash, S. A. (2007). Applicability of WEAP as water management decision support system tool on localized area of watershed scales: Tulkarem district in Palestine as case study. *11th International Water Technology Conference, IWTC, 11*.
- Heaps, C., Sieber, J., Purkey, D., & Davis, M. (2012). *Integrating the WEAP and LEAP systems to support planning and analysis at the water-energy nexus*.
- Kampf, S. K., & Burges, S. J. (2007). A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models. *Water Resources Research*, 43(5). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2006WR005370>
- Lévite, H., Sally, H., & Cour, J. (2003). Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(20–27), 779–786.
- Martínez Gutiérrez, J. (2014). *Determinación de la localización óptima para la mejor superficie destinada a viviendas en el Estado de México, con el uso de Información Geografica y Evaluación Multicriterio*.

- Molden, D. (2013). *Water for food water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture*. Routledge.
- Mugatsia, E. A. (2010). Simulation and scenario analysis of water resources management in Perkerra catchment using WEAP model. *M Asters Thesis, Department of Civil and Structural Engineering, School of Engineering, Moi University, Kenya,(December)*.
- Nesru, M. (2023). A review of model selection for hydrological studies. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(2), 102. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11194-7>
- Paul, P. K., Zhang, Y., Ma, N., Mishra, A., Panigrahy, N., & Singh, R. (2021). Selecting hydrological models for developing countries: Perspective of global, continental, and country scale models over catchment scale models. *Journal of Hydrology*, 600. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126561>
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., Voss, K., Swenson, S., & Rodell, M. (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*, 51(7), 5217–5238.
- Saaty, T. L. (1994). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces*, 24(6), 19–43.
- Saaty, T. L. (2001). *Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world*. RWS publications.
- Sánchez, K., Jiménez Otárola, F., Velásquez, S., Piedra, M., & Romero, E. (2004). Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente Número 41 (Marzo-2004), Páginas 88-95*.

- Sánchez-Canales, M., Benito, A. L., Passuello, A., Terrado, M., Ziv, G., Acuña, V., Schuhmacher, M., & Elorza, F. J. (2012). Sensitivity analysis of ecosystem service valuation in a Mediterranean watershed. *Science of the Total Environment*, 440, 140–153.
- Sieber, J. (2006). *WEAP water evaluation and planning system*.
- Thakuri, P. S., & Wijesekera, N. T. S. (2021). JOURNAL OF WATER ENGINEERING AND MANAGEMENT. *MANAGEMENT*, 2(1), 22–36.
- Tuo, Y., Chiogna, G., & Disse, M. (2015). A multi-criteria model selection protocol for practical applications to nutrient transport at the catchment scale. *Water*, 7(6), 2851–2880.
- Uribe, N. (2010). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT2005. *SWAT Soil and Water Assessment Tool*, 1–47.
- Xu, C. (2002). Hydrologic models. *Textbooks of Uppsala University. Department of Earth Sciences Hydrology*.
- Yamini Priya, R., & Manjula, R. (2021). A review for comparing SWAT and SWAT coupled models and its applications. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7190–7194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.414>

Apéndices

Apéndice A. Análisis de consistencia

Experto 1

	C1	C2	C3
C1	1,00	7,00	9,00
C2	0,14	1,00	9,00
C3	0,11	0,11	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,80	0,86	0,47	0,711
C2	0,11	0,12	0,47	0,237
C3	0,09	0,01	0,05	0,052

CW	0.71	0.24	0.05		
	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW
C1	0.71	1.66	0.46	2.83	3.99
C2	0.10	0.24	0.46	0.80	3.39
C3	0.08	0.03	0.05	0.16	3.04

$\lambda_{\min}$	3,47
α	3,00
C.I.	0,24
R.I.	0,58
C.R.	0,41

Experto 2

	C1	C2	C3
C1	1,00	1,00	1,00
C2	1,00	1,00	1,00
C3	1,00	1,00	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,33	0,33	0,33	0,333
C2	0,33	0,33	0,33	0,333
C3	0,33	0,33	0,33	0,333

CW	0,33	0,33	0,33		
	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW
C1	0,33	0,33	0,33	1,00	3,00
C2	0,33	0,33	0,33	1,00	3,00
C3	0,33	0,33	0,33	1,00	3,00

$\lambda_{\min}$	3,00
α	3,00
C.I.	0,00
R.I.	0,58
C.R.	0,00

Experto 3

	C1	C2	C3
C1	1,00	5,00	1,00
C2	0,20	1,00	1,00
C3	1,00	1,00	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,45	0,71	0,33	0,501
C2	0,09	0,14	0,33	0,189
C3	0,45	0,14	0,33	0,310

CW	0,50	0,19	0,31		
	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW
C1	0,50	0,95	0,31	1,76	3,51
C2	0,10	0,19	0,31	0,60	3,17
C3	0,50	0,19	0,31	1,00	3,22

$\lambda_{\min}$	3,30
α	3,00
C.I.	0,15
R.I.	0,58
C.R.	0,26

Experto 4

	C1	C2	C3
C1	1,00	1,00	5,00
C2	1,00	1,00	5,00
C3	0,20	0,20	1,00
SUM	2	2	11

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,45	0,45	0,45	0,455
C2	0,45	0,45	0,45	0,455
C3	0,09	0,09	0,09	0,091

CW	0,45	0,45	0,09		
	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW
C1	0,45	0,45	0,45	1,36	3,00
C2	0,45	0,45	0,45	1,36	3,00
C3	0,09	0,09	0,09	0,27	3,00

$\lambda_{\min}$	3,00
α	3,00
C.I. (consis)	0,00
R.I. (random)	0,58
C.R. (consis)	0,00

Experto 5

	C1	C2	C3
C1	1,00	1,00	5,00
C2	1,00	1,00	3,00
C3	0,20	0,33	1,00
SUM	2	2	9

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,45	0,43	0,56	0,480
C2	0,45	0,43	0,33	0,405
C3	0,09	0,14	0,11	0,115

CW	0,48	0,41	0,11		
	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW
C1	0,48	0,41	0,57	1,46	3,04
C2	0,48	0,41	0,34	1,23	3,03
C3	0,10	0,14	0,11	0,35	3,01

$\lambda_{\min}$	3,03
α	3,00
C.I. (consis)	0,01
R.I. (random)	0,58
C.R. (consis)	0,03

Experto 6

	C1	C2	C3
C1	1,00	3,00	1,00
C2	0,33	1,00	0,50
C3	1,00	2,00	1,00
SUM	2	6	3

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,43	0,50	0,40	0,443
C2	0,14	0,17	0,20	0,170
C3	0,43	0,33	0,40	0,387

CW	0,44	0,17	0,39		
	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW
C1	0,44	0,51	0,39	1,34	3,03
C2	0,15	0,17	0,19	0,51	3,01
C3	0,44	0,34	0,39	1,17	3,02

$\lambda_{\min}$	3,02
α	3,00
C.I. (consis)	0,01
R.I. (random)	0,58
C.R. (consis)	0,02

Apéndice B. Matriz agregada

Apéndice C. Consistencia subcriterios

Experto 1

C1: Resolución

	C1.1	C1.2
C1.1	1,00	5,00
C1.2	0,20	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	CW
C1	0,83	0,83	0,833
C2	0,17	0,17	0,167

CW 0,83 0,17

	C1	C2	WSV	R=WSV/CW
C1	0,83	0,83	1,67	2,00
C2	0,17	0,17	0,33	2,00

Amix	2,00
n	2,00
C.I.	0,00
R.I.	0,58
C.R.	0,00

C2: Robustez

	C2.1	C2.2	C2.3
C2.1	1,00	0,20	0,33
C2.2	5,00	1,00	9,00
C2.3	3,00	0,11	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,11	0,15	0,03	0,099
C2	0,96	0,76	0,87	0,790
C3	0,33	0,08	0,10	0,172

CW 0,10 0,73 0,17

	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW
C1	0,10	0,15	0,06	0,30	3,08
C2	0,49	0,73	1,54	2,77	3,79
C3	0,30	0,08	0,17	0,55	3,20

Amix	3,35
n	3,00
C.I.	0,17
R.I.	0,58
C.R.	0,30

C3: Accesibilidad

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4
C3.1	1,00	0,20	0,20	0,20
C3.2	5,00	1,00	0,33	3,00
C3.3	5,00	3,00	1,00	9,00
C3.4	5,00	0,33	0,11	1,00

Matriz normalizada

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	CW
C3.1	0,06	0,04	0,12	0,02	0,061
C3.2	0,31	0,22	0,20	0,23	0,241
C3.3	0,31	0,66	0,61	0,68	0,566
C3.4	0,31	0,07	0,07	0,08	0,132

CW 0,06 0,24 0,57 0,132

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	WSV	R=WSV/CW
C3.1	0,06	0,05	0,11	0,03	0,25	4,08
C3.2	0,30	0,24	0,19	0,40	1,13	4,70
C3.3	0,30	0,72	0,57	1,19	2,78	4,82
C3.4	0,30	0,08	0,06	0,13	0,58	4,38

Amix	4,52
n	4,00
C.I.	0,17
R.I.	0,90
C.R.	0,19

Experto 2

C1: Resolución

	C1.1	C1.2
C1.1	1,00	1,00
C1.2	1,00	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	CW
C1	0,50	0,50	0,500
C2	0,50	0,50	0,500

CW 0,50 0,50

	C1	C2	WSV	R=WSV/CW
C1	0,50	0,50	1,00	2,00
C2	0,50	0,50	1,00	2,00

Amix	2,00
n	2,00
C.I.	0,00
R.I.	0,58
C.R.	0,00

C2: Robustez

	C2.1	C2.2	C2.3
C2.1	1,00	1,00	5,00
C2.2	1,00	1,00	7,00
C2.3	0,20	0,14	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,45	0,47	0,38	0,435
C2	0,45	0,47	0,54	0,487
C3	0,09	0,07	0,08	0,078

CW 0,44 0,49 0,08

	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW
C1	0,44	0,49	0,39	1,31	3,02
C2	0,44	0,49	0,56	1,47	3,02
C3	0,09	0,07	0,08	0,23	3,00

Amix	3,01
n	3,00
C.I.	0,01
R.I.	0,58
C.R.	0,01

C3: Accesibilidad

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4
C3.1	1,00	7,00	5,00	5,00
C3.2	0,14	1,00	0,20	0,20
C3.3	0,20	5,00	1,00	5,00
C3.4	0,20	5,00	0,20	1,00

Matriz normalizada

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	CW
C3.1	0,65	0,39	0,78	0,45	0,566
C3.2	0,09	0,06	0,03	0,02	0,049
C3.3	0,13	0,28	0,16	0,45	0,253
C3.4	0,13	0,28	0,03	0,09	0,132

CW 0,57 0,05 0,25 0,132

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	WSV	R=WSV/CW
C3.1	0,57	0,35	1,26	0,66	2,83	5,01
C3.2	0,08	0,05	0,05	0,03	0,21	4,20
C3.3	0,11	0,25	0,25	0,66	1,27	5,04
C3.4	0,11	0,25	0,05	0,13	0,54	4,11

Amix	4,59
n	4,00
C.I.	0,20
R.I.	0,90
C.R.	0,22

Experto 3

C1: Resolución

	C1.1	C1.2
C1.1	1,00	1,00
C1.2	1,00	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	CW
C1	0,50	0,50	0,500
C2	0,50	0,50	0,500

CW 0,50 0,50

	C1	C2	WSV	R=WSV/CW
C1	0,50	0,50	1,00	2,00
C2	0,50	0,50	1,00	2,00

Amix	2,00
n	2,00
C.I.	0,00
R.I.	0,58
C.R.	0,00

C2: Robustez

	C2.1	C2.2	C2.3
C2.1	1,00	0,20	1,00
C2.2	5,00	1,00	5,00
C2.3	1,00	0,20	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,14	0,14	0,14	0,143
C2	0,71	0,71	0,71	0,714
C3	0,14	0,14	0,14	0,143

CW 0,14 0,71 0,14

	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW
C1	0,14	0,14	0,14	0,43	3,00
C2	0,71	0,71	0,71	2,14	3,00
C3	0,14	0,14	0,14	0,43	3,00

Amix	3,00
n	3,00
C.I.	0,00
R.I.	0,58
C.R.	0,00

C3: Accesibilidad

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4
C3.1	1,00	5,00	5,00	3,00
C3.2	0,20	1,00	0,33	0,33
C3.3	0,20	3,00	1,00	1,00
C3.4	0,33	3,00	1,00	1,00

Matriz normalizada

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	CW
C3.1	0,56	0,42	0,68	0,56	0,599
C3.2	0,12	0,08	0,05	0,06	0,077
C3.3	0,12	0,25	0,14	0,19	0,172
C3.4	0,19	0,25	0,14	0,19	0,192

CW 0,56 0,08 0,17 0,192

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	WSV	R=WSV/CW
C3.1	0,56	0,38	0,86	0,57	2,38	4,25
C3.2	0,11	0,08	0,06	0,06	0,31	4,04
C3.3	0,11	0,23	0,17	0,19	0,71	4,10
C3.4	0,19	0,23	0,17	0,19	0,78	4,07

Amix	4,12
n	4,00
C.I.	0,04
R.I.	0,90
C.R.	0,04

Experto 4

C1: Resolución

C1.1	C1.2
C1.1	1,00 1,00
C1.2	1,00 1,00

Matriz normalizada

C1	C2	CW
C1	0,50 0,50	0,500
C2	0,50 0,50	0,500

CW	0,50	0,50		
	C1	C2	WSV	R=WSV/CW
C1	0,50	0,50	1,00	2,00
C2	0,50	0,50	1,00	2,00

Amix	2,00
n	2,00
C.I.	0,00
R.I.	0,58
C.R.	0,00

C2: Robustez

	C2.1	C2.2	C2.3
C2.1	1,00	1,00	3,00
C2.2	1,00	1,00	3,00
C2.3	0,33	0,33	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,43	0,43	0,43	0,429
C2	0,43	0,43	0,43	0,429
C3	0,14	0,14	0,14	0,143

CW	0,43	0,43	0,14		
	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW
C1	0,43	0,43	0,43	1,29	3,00
C2	0,43	0,43	0,43	1,29	3,00
C3	0,14	0,14	0,14	0,43	3,00

Amix	3,00
n	3,00
C.I.	0,00
R.I.	0,58
C.R.	0,00

C3: Accesibilidad

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4
C3.1	1,00	1,00	5,00	5,00
C3.2	1,00	1,00	7,00	7,00
C3.3	0,20	0,14	1,00	3,00
C3.4	0,20	0,14	0,33	1,00

Matriz normalizada

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	CW
C3.1	0,42	0,44	0,38	0,31	0,385
C3.2	0,42	0,44	0,53	0,44	0,454
C3.3	0,08	0,06	0,08	0,19	0,102
C3.4	0,08	0,06	0,03	0,06	0,058

CW	0,39	0,45	0,10	0,058		
	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	W SV	R=W SV/CW
C3.1	0,39	0,45	0,51	0,29	1,64	4,38
C3.2	0,39	0,45	0,71	0,41	1,96	4,82
C3.3	0,08	0,06	0,10	0,18	0,42	4,10
C3.4	0,08	0,06	0,03	0,06	0,23	4,02

Amix	4,18
n	4,00
C.I.	0,06
R.I.	0,90
C.R.	0,07

Experto 5

C1: Resolución

C1.1	C1.2
C1.1	1,00 5,00
C1.2	0,20 1,00

Matriz normalizada

C1	C2	CW
C1	0,83 0,83	0,833
C2	0,17 0,17	0,167

CW	0,83	0,17		
	C1	C2	WSV	R=WSV/CW
C1	0,83	0,83	1,67	2,00
C2	0,17	0,17	0,33	2,00

Amix	2,00
n	2,00
C.I.	0,00
R.I.	0,58
C.R.	0,00

C2: Robustez

	C2.1	C2.2	C2.3
C2.1	1,00	3,00	1,00
C2.2	0,33	1,00	0,33
C2.3	1,00	3,00	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,43	0,43	0,43	0,429
C2	0,14	0,14	0,14	0,143
C3	0,43	0,43	0,43	0,429

CW	0,43	0,14	0,43		
	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW
C1	0,43	0,43	0,43	1,29	3,00
C2	0,14	0,14	0,14	0,43	3,00
C3	0,43	0,43	0,43	1,29	3,00

Amix	3,00
n	3,00
C.I.	0,00
R.I.	0,58
C.R.	0,00

C3: Accesibilidad

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4
C3.1	1,00	1,00	1,00	0,33
C3.2	1,00	1,00	1,00	1,00
C3.3	1,00	1,00	1,00	1,00
C3.4	3,00	1,00	1,00	1,00

Matriz normalizada

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	CW
C3.1	0,17	0,25	0,25	0,10	0,192
C3.2	0,17	0,25	0,25	0,30	0,242
C3.3	0,17	0,25	0,25	0,30	0,242
C3.4	0,50	0,25	0,25	0,30	0,325

CW	0.19	0.24	0.24	0.325		
	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	W SV	R=W SV/CW
C3.1	0.19	0.24	0.24	0.11	0.78	4.06
C3.2	0.19	0.24	0.24	0.33	1.00	4.14
C3.3	0.19	0.24	0.24	0.33	1.00	4.14
C3.4	0.58	0.24	0.24	0.33	1.38	4.28

Amix	4,15
n	4,00
C.I.	0,05
R.I.	0,90
C.R.	0,06

Experto 6

C1: Resolución

C1.1	C1.2
C1.1	1,00 5,00
C1.2	0,20 1,00

Matriz normalizada

C1	C2	CW
C1	0,83 0,83	0,833
C2	0,17 0,17	0,167

CW	0,83	0,17		
	C1	C2	WSV	R=WSV/CW
C1	0,83	0,83	1,67	2,00
C2	0,17	0,17	0,33	2,00

Amix	2,00
n	2,00
C.I.	0,00
R.I.	0,58
C.R.	0,00

C2: Robustez

	C2.1	C2.2	C2.3
C2.1	1,00	1,00	5,00
C2.2	1,00	1,00	5,00
C2.3	0,20	0,20	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,45	0,45	0,45	0,455
C2	0,45	0,45	0,45	0,455
C3	0,09	0,09	0,09	0,091

CW	0,45	0,45	0,09		
	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW
C1	0,45	0,45	0,45	1,36	3,00
C2	0,45	0,45	0,45	1,36	3,00
C3	0,09	0,09	0,09	0,27	3,00

Amix	3,00
n	3,00
C.I.	0,00
R.I.	0,58
C.R.	0,00

C3: Accesibilidad

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4
C3.1	1,00	0,20	0,33	0,33
C3.2	5,00	1,00	1,00	5,00
C3.3	3,00	1,00	1,00	5,00
C3.4	3,00	0,20	0,20	1,00

Matriz normalizada

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	CW
C3.1	0,08	0,08	0,13	0,03	0,082
C3.2	0,42	0,42	0,39	0,44	0,417
C3.3	0,25	0,42	0,39	0,44	0,376
C3.4	0,25	0,08	0,08	0,09	0,125

CW	0,08	0,42	0,38	0,125		
	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	W SV	R=W SV/CW
C3.1	0,08	0,08	0,13	0,04	0,33	4,06
C3.2	0,41	0,42	0,38	0,63	1,83	4,38
C3.3	0,25	0,42	0,38	0,63	1,66	4,48
C3.4	0,25	0,08	0,08	0,13	0,53	4,28

Amix	4,27
n	4,00
C.I.	0,09
R.I.	0,90
C.R.	0,10

Experto 7

C1: Resolución

	C1.1	C1.2
C1.1	1,00	0,14
C1.2	7,00	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	CW
C1	0,13	0,13	0,125
C2	0,88	0,88	0,875

	CW	0,13	0,88
	C1	C2	WSV
C1	0,13	0,13	0,25
C2	0,88	0,88	1,75

A _{total}	2,00
m	2,00
C.L	0,00
R.L	0,58
C.R	0,00

C2: Robustez

	C2.1	C2.2	C2.3
C2.1	1,00	1,00	5,00
C2.2	1,00	1,00	5,00
C2.3	0,20	0,20	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,45	0,45	0,45	0,455
C2	0,45	0,45	0,45	0,455
C3	0,09	0,09	0,09	0,091

	CW	0,45	0,45	0,09
	C1	C2	C3	WSV
C1	0,45	0,45	0,45	1,36
C2	0,45	0,45	0,45	1,36
C3	0,09	0,09	0,09	0,27

A _{total}	3,00
m	3,00
C.L	0,00
R.L	0,58
C.R	0,00

C3: Accesibilidad

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4
C3.1	1,00	0,33	1,00	3,00
C3.2	3,00	1,00	3,00	3,00
C3.3	1,00	0,33	1,00	3,00
C3.4	0,33	0,33	0,33	1,00

Matriz normalizada

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	CW
C3.1	0,19	0,17	0,19	0,30	0,210
C3.2	0,56	0,50	0,56	0,30	0,481
C3.3	0,19	0,17	0,19	0,30	0,210
C3.4	0,06	0,17	0,06	0,10	0,098

	CW	0,21	0,48	0,21	0,098
	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	WSV
C3.1	0,21	0,16	0,21	0,29	0,95
C3.2	0,63	0,48	0,63	0,29	2,04
C3.3	0,21	0,16	0,21	0,29	0,95
C3.4	0,07	0,16	0,07	0,10	0,40

A _{total}	4,16
m	4,00
C.L	0,05
R.L	0,90
C.R	0,06

Experto 8

C1: Resolución

	C1.1	C1.2
C1.1	1,00	0,25
C1.2	4,00	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	CW
C1	0,20	0,20	0,200
C2	0,80	0,80	0,800

	CW	0,20	0,80
	C1	C2	WSV
C1	0,20	0,20	0,40
C2	0,80	0,80	1,60

A _{total}	2,00
m	2,00
C.L	0,00
R.L	0,58
C.R	0,00

C2: Robustez

	C2.1	C2.2	C2.3
C2.1	1,00	0,20	0,25
C2.2	5,00	1,00	1,00
C2.3	4,00	1,00	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,10	0,09	0,11	0,101
C2	0,50	0,45	0,44	0,486
C3	0,40	0,45	0,44	0,433

	CW	0,10	0,47	0,43
	C1	C2	C3	WSV
C1	0,10	0,09	0,11	0,30
C2	0,50	0,47	0,43	1,40
C3	0,40	0,47	0,43	1,30

A _{total}	3,01
m	3,00
C.L	0,00
R.L	0,58
C.R	0,00

C3: Accesibilidad

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4
C3.1	1,00	1,00	3,00	0,33
C3.2	1,00	1,00	1,00	0,33
C3.3	0,33	1,00	1,00	0,33
C3.4	3,00	3,00	3,00	1,00

Matriz normalizada

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	CW
C3.1	0,19	0,17	0,38	0,17	0,224
C3.2	0,19	0,17	0,13	0,17	0,161
C3.3	0,06	0,17	0,13	0,17	0,130
C3.4	0,56	0,50	0,38	0,50	0,484

	CW	0,22	0,16	0,13	0,484
	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	WSV
C3.1	0,22	0,16	0,39	0,16	0,94
C3.2	0,22	0,16	0,13	0,16	0,68
C3.3	0,07	0,16	0,13	0,16	0,53
C3.4	0,67	0,48	0,39	0,48	2,03

A _{total}	4,16
m	4,00
C.L	0,05
R.L	0,90
C.R	0,06

Experto 9

C1: Resolución

	C1.1	C1.2
C1.1	1,00	1,00
C1.2	1,00	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	CW
C1	0,50	0,50	0,500
C2	0,50	0,50	0,500

	CW	0,50	0,50
	C1	C2	WSV
C1	0,50	0,50	1,00
C2	0,50	0,50	1,00

A _{total}	2,00
m	2,00
C.L	0,00
R.L	0,58
C.R	0,00

C2: Robustez

	C2.1	C2.2	C2.3
C2.1	1,00	0,33	1,00
C2.2	3,00	1,00	3,00
C2.3	1,00	0,33	1,00

Matriz normalizada

	C1	C2	C3	CW
C1	0,20	0,20	0,20	0,200
C2	0,60	0,60	0,60	0,600
C3	0,20	0,20	0,20	0,200

	CW	0,20	0,60	0,20
	C1	C2	C3	WSV
C1	0,20	0,20	0,20	0,60
C2	0,60	0,60	0,60	1,80
C3	0,20	0,20	0,20	0,60

A _{total}	3,00
m	3,00
C.L	0,00
R.L	0,58
C.R	0,00

C3: Accesibilidad

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4
C3.1	1,00	0,20	0,20	0,20
C3.2	5,00	1,00	1,00	1,00
C3.3	5,00	1,00	1,00	1,00
C3.4	5,00	1,00	1,00	1,00

Matriz normalizada

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	CW
C3.1	0,06	0,06	0,06	0,06	0,063
C3.2	0,31	0,31	0,31	0,31	0,313
C3.3	0,31	0,31	0,31	0,31	0,313
C3.4	0,31	0,31	0,31	0,31	0,313

	CW	0,06	0,31	0,31	0,313
	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	WSV
C3.1	0,06	0,06	0,06	0,06	0,25
C3.2	0,31	0,31	0,31	0,31	1,25
C3.3	0,31	0,31	0,31	0,31	1,25
C3.4	0,31	0,31	0,31	0,31	1,25

A _{total}	4,00
m	4,00
C.L	0,00
R.L	0,90
C.R	0,00

Ponderada

C1: Resolución		
C1.1	C1.2	
C1.1	1,00	0,98
C1.2	1,02	1,00

Matriz normalizada			
C1	C2	CW	
C1	0,50	0,50	0,495
C2	0,50	0,50	0,505

CW 0,50 0,50				
C1	C2	WSV	R=WSV/CW	
C1	0,50	0,50	0,99	2,00
C2	0,50	0,50	1,01	2,00

A _{sub}	2,00
n	2,00
C.L	0,00
R.L	0,58
C.R	0,00

C2: Robustez			
C2.1	C2.2	C2.3	
C2.1	1,00	0,76	1,63
C2.2	1,31	1,00	2,05
C2.3	0,81	0,49	1,00

Matriz normalizada				
C1	C2	C3	CW	
C1	0,34	0,34	0,35	0,343
C2	0,45	0,44	0,44	0,443
C3	0,21	0,22	0,21	0,213

CW 0,34 0,44 0,21					
C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW	
C1	0,34	0,34	0,35	1,03	3,00
C2	0,45	0,44	0,44	1,33	3,00
C3	0,21	0,22	0,21	0,84	3,00

A _{sub}	3,00
n	3,00
C.L	0,00
R.L	0,58
C.R	0,00

C3: Accesibilidad					
C3.1	C3.2	C3.3	C3.4		
C3.1	1,00	0,49	1,00	0,69	
C3.2	2,05	1,00	1,66	1,81	
C3.3	1,00	0,60	1,00	1,57	
C3.4	1,44	0,55	0,64	1,00	

Matriz normalizada						
C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	CW		
C3.1	0,18	0,18	0,23	0,14	0,194	
C3.2	0,37	0,38	0,39	0,38	0,374	
C3.3	0,18	0,23	0,23	0,31	0,238	
C3.4	0,28	0,21	0,15	0,20	0,204	

CW 0,18 0,37 0,24 0,204						
C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	WSV	R=WSV/CW	
C3.1	0,18	0,18	0,24	0,14	0,75	4,05
C3.2	0,38	0,37	0,40	0,37	1,52	4,05
C3.3	0,18	0,23	0,24	0,32	0,97	4,07
C3.4	0,27	0,21	0,15	0,20	0,83	4,05

A _{sub}	4,05
n	4,00
C.L	0,02
R.L	0,90
C.R	0,02

Apéndice D. Matriz agregada subcriterios

Matriz agregada

C1: Resolución		
C1.1	C1.2	
C1.1	1,00	0,98
C1.2	1,02	1,00

Matriz normalizada			
C1	C2	CW	
C1.1	0,50	0,50	0,495
C1.2	0,50	0,50	0,505

CW 0,50 0,50				
C1	C2	WSV	R=WSV/CW	
C1	0,50	0,50	0,99	2,00
C2	0,50	0,50	1,01	2,00

A _{sub}	2,00
n	2,00
C.L	0,00
R.L	0,58
C.R	0,00

C2: Robustez			
C2.1	C2.2	C2.3	
C2.1	1,00	0,76	1,63
C2.2	1,31	1,00	2,05
C2.3	0,81	0,49	1,00

Matriz normalizada				
C1	C2	C3	CW	
C2.1	0,34	0,34	0,35	0,343
C2.2	0,45	0,44	0,44	0,443
C2.3	0,21	0,22	0,21	0,213

CW 0,34 0,44 0,21					
C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW	
C1	0,34	0,34	0,35	1,03	3,00
C2	0,45	0,44	0,44	1,33	3,00
C3	0,21	0,22	0,21	0,84	3,00

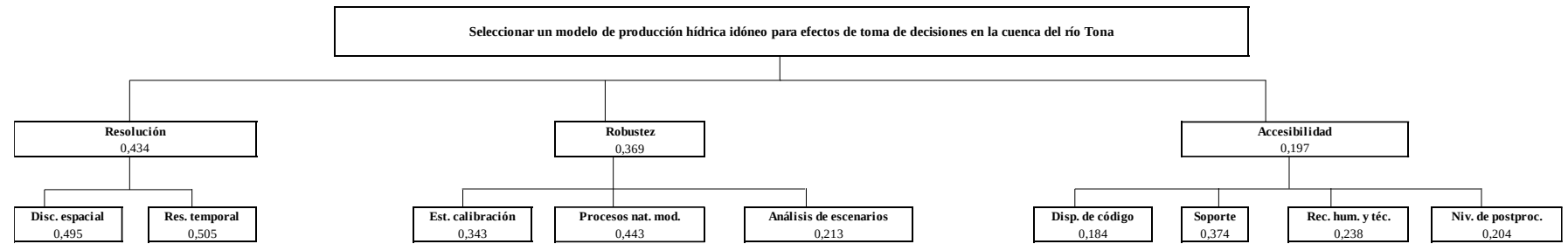
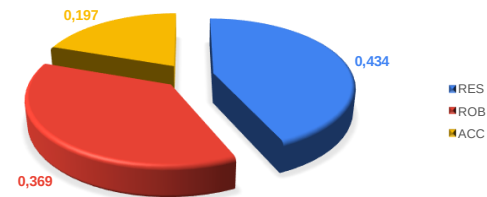
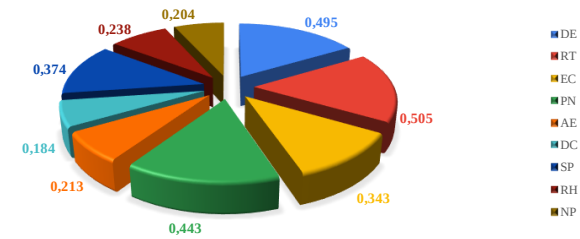
A _{sub}	3,00
n	3,00
C.L	0,00
R.L	0,58
C.R	0,00

C3: Accesibilidad					
C3.1	C3.2	C3.3	C3.4		
C3.1	1,00	0,49	1,00	0,69	
C3.2	2,05	1,00	1,66	1,81	
C3.3	1,00	0,60	1,00	1,57	
C3.4	1,44	0,55	0,64	1,00	

Matriz normalizada						
C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	CW		
C3.1	0,18	0,18	0,23	0,14	0,194	
C3.2	0,37	0,38	0,39	0,38	0,374	
C3.3	0,18	0,23	0,23	0,31	0,238	
C3.4	0,28	0,21	0,15	0,20	0,204	

CW 0,18 0,37 0,24 0,204						
C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	WSV	R=WSV/CW	
C3.1	0,18	0,18	0,24	0,14	0,75	4,05
C3.2	0,38	0,37	0,40	0,37	1,52	4,05
C3.3	0,18	0,23	0,24	0,32	0,97	4,07
C3.4	0,27	0,21	0,15	0,20	0,83	4,05

A _{sub}	4,05
n	4,00
C.L	0,02
R.L	0,90
C.R	0,02

Apéndice E. Ponderación final de los criterios y subcriterios**PONDERACIÓN CRITERIOS****PONDERACIÓN SUBCRITERIOS**

Apéndice F. Aplicación de la metodología AHP

Subcriterio:	Discr. Esp			MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
	SWAT	InVEST	WEAP				
SWAT	1,00	0,60	3,00	0,33	0,33	0,33	0,33
InVEST	1,67	1,00	5,00	0,56	0,56	0,56	0,56
WEAP	0,33	0,20	1,00	0,11	0,11	0,11	0,11
TOTAL	3,00	1,80	9,00				1,00

Subcriterio:	Resol. Temp			MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
	SWAT	InVEST	WEAP				
SWAT	1,00	1,67	1,67	0,45	0,45	0,45	0,45
InVEST	0,60	1,00	1,00	0,27	0,27	0,27	0,27
WEAP	0,60	1,00	1,00	0,27	0,27	0,27	0,27
TOTAL	2,20	3,67	3,67				1,00

Subcriterio:	Estrategia de calibración			MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
	SWAT	InVEST	WEAP				
SWAT	1,00	5,00	1,67	0,56	0,56	0,56	0,56
InVEST	0,20	1,00	0,33	0,11	0,11	0,11	0,11
WEAP	0,60	3,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33
TOTAL	1,80	9,00	3,00				1,00

Subcriterio:	Procesos nat. mod.			MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
	SWAT	InVEST	WEAP				
SWAT	1,00	1,25	1,25	0,38	0,38	0,38	0,38
InVEST	0,80	1,00	1,00	0,31	0,31	0,31	0,31
WEAP	0,80	1,00	1,00	0,31	0,31	0,31	0,31
TOTAL	2,60	3,25	3,25				1,00

Subcriterio:	Análisis de escenarios			MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
	SWAT	InVEST	WEAP				
SWAT	1,00	2,00	1,00	0,40	0,40	0,40	0,40
InVEST	0,50	1,00	0,50	0,20	0,20	0,20	0,20
WEAP	1,00	2,00	1,00	0,40	0,40	0,40	0,40
TOTAL	2,50	5,00	2,50				1,00

Subcriterio:	Disp. de código			MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
	SWAT	InVEST	WEAP				
SWAT	1,00	1,00	2,50	0,42	0,42	0,42	0,42
InVEST	1,00	1,00	2,50	0,42	0,42	0,42	0,42
WEAP	0,40	0,40	1,00	0,17	0,17	0,17	0,17
TOTAL	2,40	2,40	6,00				1,00

Subcriterio:	Soporte			MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
	SWAT	InVEST	WEAP				
SWAT	1,00	2,50	1,67	0,50	0,50	0,50	0,50
InVEST	0,40	1,00	0,67	0,20	0,20	0,20	0,20
WEAP	0,60	1,50	1,00	0,30	0,30	0,30	0,30
TOTAL	2,00	5,00	3,33				1,00

Subcriterio:	Rec. hum. y téc.			MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
	SWAT	InVEST	WEAP				
SWAT	1,00	0,33	0,25	0,13	0,13	0,13	0,13
InVEST	3,00	1,00	0,75	0,38	0,38	0,38	0,38
WEAP	4,00	1,33	1,00	0,50	0,50	0,50	0,50
TOTAL	8,00	2,67	2,00				1,00

Subcriterio:	Niv. de postproc.			MATRIZ NORMALIZADA			VECTOR PROMEDIO
	SWAT	InVEST	WEAP				
SWAT	1,00	0,75	0,60	0,25	0,25	0,25	0,25
InVEST	1,33	1,00	0,80	0,33	0,33	0,33	0,33
WEAP	1,67	1,25	1,00	0,42	0,42	0,42	0,42
TOTAL	4,00	3,00	2,40				1,00

Subcriterio	Discretización espacial	Resolución espacial	Priorización interna	Priorización global
SWAT	0,333	0,455	0,395	0,171
InVEST	0,556	0,273	0,413	0,179
WEAP	0,111	0,273	0,193	0,084
Ponderación interna	0,495	0,505	1,000	0,434

Subcriterio	Est. Calibr.	Procesos nat. mod.	Análisis de escenarios	Priorización interna	Priorización global
SWAT	0,556	0,385	0,400	0,447	0,165
InVEST	0,111	0,308	0,200	0,217	0,080
WEAP	0,333	0,308	0,400	0,336	0,124
Ponderación	0,343	0,443	0,213	1,000	0,369

Subcriterio	Disp. de código	Soporte	Rec. hum. y téc.	Niv. de postproc.	Priorización interna	Priorización global
SWAT	0,417	0,500	0,125	0,250	0,344	0,068
InVEST	0,417	0,200	0,375	0,333	0,309	0,061
WEAP	0,167	0,300	0,500	0,417	0,347	0,068
Ponderación	0,184	0,374	0,238	0,204	1,000	0,227

Apéndice G. Modelo elegido, según metodología AHP

Criterio	Resolución	Robustez	Accesibilidad	Priorización
SWAT	0,395	0,447	0,344	0,404
InVEST	0,413	0,217	0,309	0,320
WEAP	0,193	0,336	0,347	0,276
Ponderación global	0,434	0,369	0,197	1,000

Utilizando la metodología AHP, se seleccionó SWAT como el modelo óptimo para la gestión de la Cuenca del Río Tona en los Andes colombianos, debido a su destacado desempeño

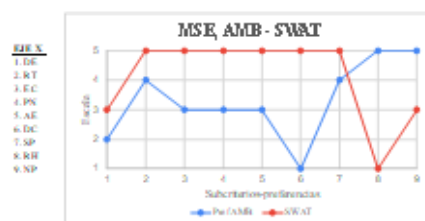
en aspectos clave, mediante el análisis de los datos obtenidos de los expertos se determinó que la resolución tuvo más peso entre los criterios seguido por la robustez y por último la accesibilidad.

Apéndice H. Selección del modelo según preferencias de los usuarios, usando el método MSE (Mean Square Error)

AMB				
Resolución				
n	2			
Preferencia	Swat	$(Y-X)^2$	MSE	1
1 DE	2	3	1	
2 RT	4	5	1	
Sumatoria	2			
Robustez				
n	3			
Preferencia	Swat	$(Y-X)^2$	MSE	###
3 EC	3	5	4	
4 PN	3	5	4	
5 AE	3	5	4	
Sumatoria	12			
Accesibilidad				
n	4			
Preferencia	Swat	$(Y-X)^2$	MSE	9.3
6 DC	1	5	16	
7 SP	4	5	1	
8 RH	5	1	16	
9 NP	5	3	4	
Sumatoria	37			

Resolución				
n	2			
Preferencia	Invest	$(Y-X)^2$	MSE	5
1 DE	2	5	9	
2 RT	4	3	1	
Sumatoria	10			
Robustez				
n	3			
Preferencia	Invest	$(Y-X)^2$	MSE	1.75
3 EC	3	1	4	
4 PN	3	4	1	
5 AE	3	2.5	0.25	
Sumatoria	5.25			
Accesibilidad				
n	4			
Preferencia	Invest	$(Y-X)^2$	MSE	6.25
6 DC	1	5	16	
7 SP	4	2	4	
8 RH	5	3	4	
9 NP	5	4	1	
Sumatoria	25			

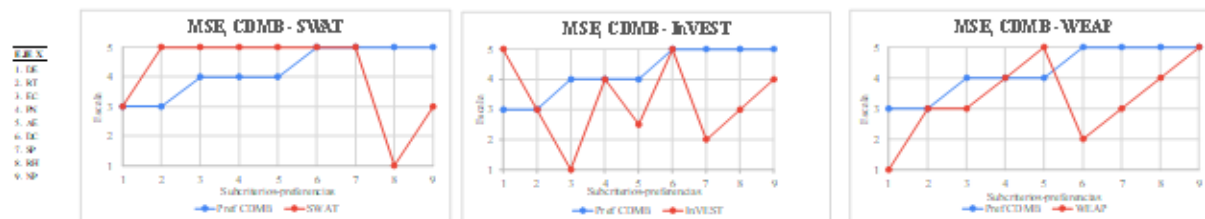
Resolución				
n	2			
Preferencia	WEAP	$(Y-X)^2$	MSE	1
1 DE	2	1	1	
2 RT	4	3	1	
Sumatoria	2			
Robustez				
n	3			
Preferencia	WEAP	$(Y-X)^2$	MSE	1.67
3 EC	3	3	0	
4 PN	3	4	1	
5 AE	3	5	4	
Sumatoria	5			
Accesibilidad				
n	4			
Preferencia	WEAP	$(Y-X)^2$	MSE	0.75
6 DC	1	2	1	
7 SP	4	3	1	
8 RH	5	4	1	
9 NP	5	5	0	
Sumatoria	3			



CDMB				
Resolución				
n	2			
Pref	Swat	$(Y-X)^2$	MSE	2
1 DE	3	3	0	
2 RT	3	5	4	
Sumatoria	4			
Robustez				
n	3			
Pref	Swat	$(Y-X)^2$	MSE	###
3 EC	4	5	1	
4 PN	4	5	1	
5 AE	4	5	1	
Sumatoria	3			
Accesibilidad				
n	4			
Pref	Swat	$(Y-X)^2$	MSE	5
6 DC	5	5	0	
7 SP	5	5	0	
8 RH	5	1	16	
9 NP	5	3	4	
Sumatoria	20			

Resolución				
n	2			
Pref	Invest	$(Y-X)^2$	MSE	2
1 DE	3	5	4	
2 RT	3	3	0	
Sumatoria	4			
Robustez				
n	3			
Pref	Invest	$(Y-X)^2$	MSE	3.75
3 EC	4	1	9	
4 PN	4	4	0	
5 AE	4	2.5	2.25	
Sumatoria	11.25			
Accesibilidad				
n	4			
Pref	Invest	$(Y-X)^2$	MSE	3.5
6 DC	5	5	0	
7 SP	5	2	9	
8 RH	5	3	4	
9 NP	5	4	1	
Sumatoria	14			

Resolución				
n	2			
Pref	WEAP	$(Y-X)^2$	MSE	2
1 DE	3	1	4	
2 RT	3	3	0	
Sumatoria	4			
Robustez				
n	3			
Pref	WEAP	$(Y-X)^2$	MSE	0.67
3 EC	4	3	1	
4 PN	4	4	0	
5 AE	4	5	1	
Sumatoria	2			
Accesibilidad				
n	4			
Pref	WEAP	$(Y-X)^2$	MSE	3.5
6 DC	5	2	9	
7 SP	5	3	4	
8 RH	5	4	1	
9 NP	5	5	0	
Sumatoria	14			



TONA					
Resolución					
n	2			MSE	2.5
	Prof	Swat	(Y-X)^2		
1 DE	4	3	1		
2 RT	3	5	4		
	Sumatoria		5		
Robustes					
n	3			MSE	###
	Prof	Swat	(Y-X)^2		
3 EC	4	5	1		
4 PN	3	5	4		
5 AE	4	5	1		
	Sumatoria		6		
Accesibilidad					
n	4			MSE	10
	Prof	Swat	(Y-X)^2		
6 DC	1	5	16		
7 SP	3	5	4		
8 RH	5	1	16		
9 NP	5	3	4		
	Sumatoria		40		

TONA					
Resolución					
n	2			MSE	0.5
	Prof	Invest	(Y-X)^2		
1 DE	4	5	1		
2 RT	3	3	0		
	Sumatoria		1		
Robustes					
n	3			MSE	4.08
	Prof	Invest	(Y-X)^2		
3 EC	4	1	9		
4 PN	3	4	1		
5 AE	4	2.5	2.25		
	Sumatoria		12.25		
Accesibilidad					
n	4			MSE	5.5
	Prof	Invest	(Y-X)^2		
6 DC	1	5	16		
7 SP	3	2	1		
8 RH	5	3	4		
9 NP	5	4	1		
	Sumatoria		22		

TONA					
Resolución					
n	2			MSE	4.5
	Prof	WEAP	(Y-X)^2		
1 DE	4	1	9		
2 RT	3	3	0		
	Sumatoria		9		
Robustes					
n	3			MSE	1.00
	Prof	WEAP	(Y-X)^2		
3 EC	4	3	1		
4 PN	3	4	1		
5 AE	4	5	1		
	Sumatoria		3		
Accesibilidad					
n	4			MSE	0.5
	Prof	WEAP	(Y-X)^2		
6 DC	1	2	1		
7 SP	3	3	0		
8 RH	5	4	1		
9 NP	5	5	0		
	Sumatoria		2		



Apéndice I. Herramienta usada con los expertos

Formulario de valoración de criterios para la selección de un modelo de producción hídrica idóneo para propósitos de manejo de la cuenca del río Tona

El proyecto "Selección de un modelo de producción hídrica idóneo para propósitos de manejo de una cuenca abastecedora de los andes colombianos, caso de estudio: Cuenca del Río Tona" tiene como propósito la identificación objetiva de un modelo de producción hídrica que permita la toma de decisiones informadas en esta cuenca hidrográfica, que juega un papel crucial en el suministro de agua potable al área metropolitana de Bucaramanga.

Para alcanzar este propósito, se aplicará la metodología Proceso Analítico Jerárquico (AHP), desarrollado por Thomas Saaty [1]. En la etapa inicial de la metodología, de la cual hace parte este formulario, se propone la participación de un grupo de expertos con amplia experiencia en el campo de la modelación hidrológica. Su colaboración como experto resulta fundamental para asignar pesos a los diversos criterios y subcriterios relevantes para la selección del modelo de producción hídrica. Estos criterios han sido previamente seleccionados mediante un ejercicio de revisión bibliográfica y un posterior proceso de depuración.

Los resultados de este proceso servirán como insumo para la segunda parte del trabajo, que consiste en una valoración de los diferentes criterios y subcriterios por los usuarios finales, teniendo en cuenta los recursos y capacidades existentes en cada institución y las necesidades particulares establecidas por la normatividad y su objeto misional.

Apreciado investigador, su participación en este proceso es invaluable para el avance del trabajo propuesto. Agradecemos de antemano el tiempo y esfuerzo que dedique para completar este formulario y, por su participación, nos comprometemos a compartir con ustedes los resultados finales de este ejercicio.

[1] T. L. Saaty, "How to make a decision: the analytic hierarchy process," *Interfaces* (Providence), vol. 24, no. 6, pp. 19–43, 1994.

* Indica que la pregunta es obligatoria

1. Correo *

2. Consentimiento Informado *

Por favor, lea esta sección cuidadosamente y, una vez considerados todos los aspectos establecidos, proceda a manifestar su acuerdo o desacuerdo con el consentimiento.

La información recopilada a través de este formulario es confidencial y su único fin es el académico en el marco del desarrollo del trabajo de grado "Selección de un modelo de producción hídrica idóneo para propósitos de manejo de una cuenca abastecedora de los andes colombianos, caso de estudio: Cuenca del Río Tona", cuya descripción se realizó en la sección anterior.

La participación en el diligenciamiento de este formulario es completamente voluntaria, no representa riesgos para los participantes, y no tiene asociada una compensación económica. Sin embargo, los miembros del equipo de trabajo del proyecto se comprometen a compartir los resultados finales del ejercicio realizado con los expertos que participen en el proceso de valoración de criterios y subcriterios.

La información recolectada en este formulario será guardada y procesada por el equipo investigador para realizar productos como: documentos escritos, artículos, comunicaciones en eventos científicos. La circulación de estos productos se realizará en medios tales como: web, libro impreso, cartillas, revistas, entre otros. Por lo tanto: Deseo participar en el proyecto de investigación de la Universidad Industrial de Santander anteriormente citado. El objetivo me ha sido mencionado claramente y conozco los beneficios y riesgos de mi participación en el proyecto ante lo cual decido que mi participación implique:

Marque todas las casillas que apliquen

Selecciona todos los que correspondan.

- ☐ Ser encuestado.
- ☐ Evaluar criterios y subcriterios de modelación mediante la metodología AHP.
- ☐ Participar en el proceso de selección del modelo de producción hídrica.
- ☐ Permitir que mis aportes sean citados de manera anónima en los productos del estudio.
- ☐ Permitir que mis aportes sean citados con mi nombre en los productos del estudio.
- ☐ No estoy interesado en participar.

INFORMACIÓN IMPORTANTE PARA LA VALORACIÓN DE CRITERIOS Y SUBCRITERIOS

A continuación, se presentará: i) el árbol de jerarquía que presenta la estructura de los criterios y subcriterios relevantes para la selección de un modelo de producción hídrica; ii) la definición de los criterios y subcriterios, lo que le permitirá conocer de forma más cercana los aspectos que se están evaluando; y iii) instrucciones para la valoración de cada criterio y subcriterio. Su valoración como experto será un componente clave en la selección del modelo de producción hídrica más idóneo para el manejo de la cuenca del Río Tona, por ello es crucial leer y comprender toda la información presentada.

Árbol de jerarquía

La siguiente figura muestra el árbol de jerarquía propuesto para la selección de un modelo de producción hídrica idóneo para propósitos de manejo de la cuenca del río Tona:



Definición de criterios

En la Tabla 1 se encuentra la definición de los criterios seleccionados para el presente estudio.

Criterios	Definición
Resolución	Se refiere a la capacidad del modelo de producción hídrica para capturar y representar adecuadamente la exactitud y detalle espacial y temporal de los procesos hidrológicos.
Robustez	Capacidad del programa para manejar diferentes condiciones y escenarios hidrológicos de manera efectiva y consistente, incluyendo variaciones en los datos, incertidumbres y condiciones extremas.
Accesibilidad	Facilidad de uso del programa, incluyendo una interfaz intuitiva, documentación clara y aprendizaje rápido, para permitir que un amplio rango de usuarios pueda utilizarlo de manera efectiva.

Definición de los subcriterios

La Tabla 2 muestra la definición de cada subcriterio tenido en cuenta para el proyecto.

Criterios	Subcriterios	Explicación del subcriterio
Resolución	Discretización espacial usada por el modelo	Se refiere a la resolución o tamaño de la mínima unidad utilizada por el modelo para representar la cuenca hidrográfica. Una mayor discretización espacial puede proporcionar mayor detalle, pero puede requerir más datos desconocidos en el sitio de estudio y aumentar la complejidad computacional.
	Resolución temporal mínima de salida	Intervalo o frecuencia de los datos de salida del modelo (diaria, semanal, mensual, anual).
Robustez	Estrategia de calibración	Hace referencia a la herramienta o estrategia utilizada para ajustar los parámetros del modelo y obtener una mejor correspondencia entre las salidas del modelo y los datos observados (automática, semiautomática, manual).
	Procesos naturales modelados	Se refiere a los componentes del ciclo hidrológico que modela (precipitación, evaporación, escorrentía, entre otros).
	Análisis de escenarios	Hace referencia a si el modelo simula escenarios futuros, incorpora los procesos antrópicos relevantes, como la gestión del agua (oferta y demanda) y prácticas agrícolas, el impacto de infraestructuras humanas (represas, canales de riego, etc), y otros factores antropogénicos que puedan afectar el sistema hídrico de la cuenca.
Accesibilidad	Disponibilidad del código	Si cuenta con código abierto, disponible por solicitud o solo ejecutable.
	Soporte	Documentación (manual de referencia, guía de usuario, manual de aplicaciones), canales de asistencia al usuario, una base de conocimientos actualizada y acceso a una línea directa de soporte técnico o chat en vivo, actualizaciones periódicas, parches de seguridad y una comunidad activa de usuarios para intercambiar ideas y solucionar problemas.
	Recursos humanos y técnicos	Se refiere al nivel de conocimiento y habilidades técnicas necesarias para operar y utilizar efectivamente el modelo, esto incorporado a una interfaz gráfica amigable.
	Nivel de postprocesamiento	Evalúa el grado de procesamiento adicional necesario para obtener resultados finales interpretables y listos para su aplicación. Algunos modelos pueden requerir un mayor nivel de postprocesamiento, lo que puede implicar más tiempo y esfuerzo por parte del usuario.

Instrucciones

Lea cuidadosamente cada criterio y subcriterio proporcionado en el formulario de evaluación. Utilice la escala proporcionada en la Tabla 3 para comparar cada par de criterios/subcriterios y asignar su preferencia relativa.

Considere los siguientes aspectos al realizar las comparaciones:

- La relevancia y contribución de cada criterio/subcriterio para la selección de un modelo de producción hídrica idóneo para propósitos de manejo de una cuenca.
- Cómo cada criterio/subcriterio afecta los resultados y el desempeño de un modelo de producción hídrica.
- Su experiencia y conocimientos en el campo de la producción hídrica y el manejo de cuencas.

Escala de evaluación

En la Tabla 3 se presenta la escala verbal a usar en la comparación. Utilice esta escala para comparar por pares por los criterios y subcriterios con base en su percepción sobre la relación de importancia entre ellos.

Escala verbal	Explicación
Extremadamente menos importante	La menor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
Mucho menos importante	El criterio A es mucho menos importante que el criterio B
Menos importante	La experiencia y el juicio desfavorecen fuertemente el criterio A sobre el B
Ligeramente menos importante	La experiencia y el juicio desfavorecen ligeramente el criterio A sobre el B
Igual de importante	El criterio A es igual de importante que el criterio B
Ligeramente más importante	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente el criterio A sobre el B
Más importante	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
Mucho más importante	El criterio A es mucho más importante que el criterio B
Extremadamente más importante	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda

En caso de tener alguna duda sobre el proceso, o pregunta específica, no dude en contactarnos a los siguientes correos:

andres2175504@correo.uis.edu.co

jhon2175571@correo.uis.edu.co

Definición de la importancia de los criterios

8. La **estrategia de calibración** es _____ que el **análisis de escenarios**. *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Extremadamente más importante
- ☐ Mucho más importante
- ☐ Más importante
- ☐ Ligeramente más importante
- ☐ Igual de importante
- ☐ Ligeramente menos importante
- ☐ Menos importante
- ☐ Mucho menos importante
- ☐ Extremadamente menos importante

9. Los **procesos naturales modelados** son _____ que el **análisis de escenarios**. *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Extremadamente más importante
- ☐ Mucho más importante
- ☐ Más importante
- ☐ Ligeramente más importante
- ☐ Igual de importante
- ☐ Ligeramente menos importante
- ☐ Menos importante
- ☐ Mucho menos importante
- ☐ Extremadamente menos importante

10. La **disponibilidad del código** es _____ que el **soporte**. *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Extremadamente más importante
- ☐ Mucho más importante
- ☐ Más importante
- ☐ Ligeramente más importante
- ☐ Igual de importante
- ☐ Ligeramente menos importante
- ☐ Menos importante
- ☐ Mucho menos importante
- ☐ Extremadamente menos importante

11. La **disponibilidad del código** es _____ que los **recursos humanos técnicos**. *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Extremadamente más importante
- ☐ Mucho más importante
- ☐ Más importante
- ☐ Ligeramente más importante
- ☐ Igual de importante
- ☐ Ligeramente menos importante
- ☐ Menos importante
- ☐ Mucho menos importante
- ☐ Extremadamente menos importante

12. La **disponibilidad del código** es _____ que el **nivel de postprocesamiento**. *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Extremadamente más importante
- ☐ Mucho más importante
- ☐ Más importante
- ☐ Ligeramente más importante
- ☐ Igual de importante
- ☐ Ligeramente menos importante
- ☐ Menos importante
- ☐ Mucho menos importante
- ☐ Extremadamente menos importante

13. El **soporte** es _____ que los **recursos humanos y técnicos**. *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Extremadamente más importante
- ☐ Mucho más importante
- ☐ Más importante
- ☐ Ligeramente más importante
- ☐ Igual de importante
- ☐ Ligeramente menos importante
- ☐ Menos importante
- ☐ Mucho menos importante
- ☐ Extremadamente menos importante

14. El **soporte** es _____ que el **nivel de postprocesamiento**. *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Extremadamente más importante
- ☐ Mucho más importante
- ☐ Más importante
- ☐ Ligeramente más importante
- ☐ Igual de importante
- ☐ Ligeramente menos importante
- ☐ Menos importante
- ☐ Mucho menos importante
- ☐ Extremadamente menos importante

15. Los **recursos humanos y técnicos** son _____ que el **nivel de postprocesamiento**. *

Marca solo un óvalo.

- ☐ Extremadamente más importante
- ☐ Mucho más importante
- ☐ Más importante
- ☐ Ligeramente más importante
- ☐ Igual de importante
- ☐ Ligeramente menos importante
- ☐ Menos Importante
- ☐ Mucho menos importante
- ☐ Extremadamente menos importante

Agradecimientos

Agradecemos el tiempo y esfuerzo que dedicó para completar este formulario y, por su participación, nos comprometemos a compartir con ustedes los resultados finales de este ejercicio.

Este contenido no ha sido creado ni aprobado por Google.

Google Formularios

Apéndice J. Detalle de la metodología AHP para la ponderación de los criterios y subcriterios

Se ha aplicado el método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) para establecer la relevancia de los criterios y subcriterios contemplados para este estudio, siguiendo las etapas y procedimientos recomendados por Saaty (Basak & Saaty, 1993; Saaty, 1994). En este sentido, el

objetivo general se definió como “Seleccionar un modelo de producción hídrica idóneo para efectos de toma de decisiones en la cuenca del río Tona”. A continuación, se muestra los criterios y subcriterios que se tuvieron en cuenta, luego de una exhaustiva revisión bibliográfica y posterior depuración:

Objetivo general	Criterio/subcriterio	Abreviatura
Seleccionar un modelo de producción hídrica idóneo para efectos de toma de decisiones en la cuenca del río Tona	C1 Resolución	RES
	C1.1 Discretización espacial usada por el modelo	DE
	C1.2 Resolución temporal mínima de salida	RT
	C2 Robustez	ROB
	C2.1 Estrategia de calibración	EC
	C2.2 Procesos naturales modelados	PN
	C2.3 Análisis de escenarios	AE
	C3 Accesibilidad	ACC
	C3.1 Disponibilidad de código	DC
	C3.2 Soporte	SP
	C3.3 Recursos humanos y técnicos	RH
	C3.4 Nivel de postprocesamiento	NP

De este modo, utilizando los resultados de la encuesta aplicada a los expertos, se construyeron matrices de comparación para los juicios realizados por cada experto, donde se valoraba la importancia de un criterio/subcriterio sobre otro, según su importancia para alcanzar el objetivo general de este estudio (ver **Tabla J1**). A estas matrices se les llamó Matrices de Evaluación.

Tabla J1.

Matriz de Evaluación del Experto 1

Experto 1			
	C1	C2	C3
C1	1	7	9
C2	1/7	1	9
C3	1/9	1/9	1

Posteriormente, para cada matriz de evaluación, se preparó una matriz normalizada. Los valores de cada celda se obtuvieron dividiendo cada miembro de la matriz de evaluación por la suma de cada columna de esta matriz, según correspondiera. Luego, se obtuvo el vector de prioridad (Eigen Vector), el cual fue determinado como el promedio simple de cada fila de la matriz normalizada. Este valor define el peso de cada atributo con respecto al objetivo general (Saaty, 1994). La **Tabla J2** muestra la matriz normalizada para el Experto 1.

Tabla J2.

Matriz normalizada, vector de prioridad y consistencia del Experto 1

	C1	C2	C3	CW
C1	0.80	0.86	0.47	0.711
C2	0.11	0.12	0.47	0.237
C3	0.09	0.01	0.05	0.052

Para saber si los juicios de los expertos eran válidos para continuar con el estudio, se realizó un análisis de consistencia, evaluado a través del radio de consistencia (CR). Para una matriz de 3x3, la consistencia es aceptable si el radio de consistencia es menor al 5%, mientras que para una matriz de 4x4, debe ser inferior al 9% (Saaty, 2001). Para obtener el valor del CR, se construyó una matriz resultante del producto entre la Matriz de Evaluación y el Vector de Prioridad. Luego se obtuvo el vector suma de los pesos (WSV), como la suma de las filas de la matriz resultante. Más adelante, se obtuvo el valor del vector R, que es igual al cociente entre los miembros del Vector de Prioridad y el WSV. La **Tabla J3** muestra el procedimiento realizado con los resultados del Experto 1.

Tabla J3.

Matriz resultante, WSV y R para el Experto 1

CW	0.71	0.24	0.05		
	C1	C2	C3	WSV	R=WSV/CW

C1	0.71	1.66	0.46	2.83	3.99
C2	0.10	0.24	0.46	0.80	3.39
C3	0.08	0.03	0.05	0.16	3.04

Luego, se halló $\lambda_{\max}$ como el promedio simple de los miembros del vector R.

$$\lambda_{\max} = \frac{3.99 + 3.39 + 3.04}{3} = 3.47$$

Posteriormente, se calculó el Índice de Consistencia (CI). Para una matriz $n \times n$, donde n corresponde al orden de la matriz, CI se define como:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Posteriormente, se asignó el valor al Índice de Consistencia Aleatorio (RI), de acuerdo con lo sugerido por Saaty (Saaty, 1994):

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Finalmente, el Radio de Consistencia (CR) se determinó como el cociente entre el Índice de Consistencia (CI) y el Índice de Consistencia Aleatorio (RI):

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

Para el Experto 1,

$$CI = \frac{3.47 - 3}{3 - 1} = 0.24$$

Con $RI = 0.58$ ($n = 3$):

$$CR = \frac{0.24}{0.58} = 0.41 \approx 41\%$$

Al igual que en el caso del Experto 1, aquellos juicios cuyo CR fueron mayor al 10% fueron descartados para la estimación de los pesos de los criterios y subcriterios.

Con aquellos juicios que resultaron consistentes, se obtuvo una matriz agregada, es decir, se agregó la comparación por pares de cada experto como una media geométrica (Basak & Saaty, 1993). Por ejemplo, el experto n y el experto $n+1$ tienen las matrices de comparación por pares mostradas en la **Tabla J4**. Note que cada celda de la matriz agregada al final es generada por la media geométrica de las celdas correspondientes de la matriz de comparación de cada experto.

Tabla J4.

Ejemplo de obtención de la matriz agregada

Experto n			Experto n+1		
C1: Resolución			C1: Resolución		
	C1.1	C1.2		C1.1	C1.2
C1.1	1.00	1.00	C1.1	1.00	5.00
C1.2	1.00	1.00	C1.2	0.20	1.00
Matriz agregada					
C1: Resolución					
	C1.1	C1.2			
C1.1	1.00	2.24			
C1.2	0.45	1.00			

Con la matriz de evaluación agregada, se realizó nuevamente el procedimiento para obtener el peso definitivo de los criterios y subcriterios. La **Tabla J5** muestra la matriz de evaluación agregada, la matriz normalizada y el vector de prioridad de los criterios.

Tabla J5.

Matriz de evaluación agregada, matriz normalizada y vector de prioridad de los criterios.

Ponderación

	C1	C2	C3
C1	1.00	1.20	2.15
C2	0.83	1.00	1.92
C3	0.46	0.52	1.00
SUM	2	3	5

Matriz normalizada

	Eigen Vector			
	C1	C2	C3	CW
C1	0.44	0.44	0.42	0.434
C2	0.36	0.37	0.38	0.369
C3	0.20	0.19	0.20	0.197

La **Tabla J6** muestra la matriz de evaluación agregada, la matriz normalizada y el vector de prioridad de los subcriterios.

Tabla J6.

Matriz de evaluación agregada, matriz normalizada y vector de prioridad de los subcriterios

Ponderada

C1: Resolución		
	C1.1	C1.2
C1.1	1.00	0.98
C1.2	1.02	1.00

Matriz normalizada			
	C1.1	C1.2	CW
C1.1	0.50	0.50	0.495
C1.2	0.50	0.50	0.505

C2: Robustez			
	C2.1	C2.2	C2.3

Matriz normalizada				
	C2.1	C2.2	C2.3	CW

C2.1	1.00	0.76	1.63
C2.2	1.31	1.00	2.05
C2.3	0.61	0.49	1.00

C2.1	0.34	0.34	0.35	0.343
C2.2	0.45	0.44	0.44	0.443
C2.3	0.21	0.22	0.21	0.213

C3: Accesibilidad

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4
C3.1	1.00	0.49	1.00	0.69
C3.2	2.05	1.00	1.66	1.81
C3.3	1.00	0.60	1.00	1.57
C3.4	1.44	0.55	0.64	1.00

Matriz normalizada

	C3.1	C3.2	C3.3	C3.4	CW
C3.1	0.18	0.18	0.23	0.14	0.184
C3.2	0.37	0.38	0.39	0.36	0.374
C3.3	0.18	0.23	0.23	0.31	0.238
C3.4	0.26	0.21	0.15	0.20	0.204

Apéndice K. Tabla de caracterización de criterios y subcriterios

Criterio			SWAT		INVEST		WEAP			
C.1	Resolución	C1.1	Discretización espacial usada por el modelo		HRU (Unidad de Respuesta Hidrológica)	3	Pixel	5	Subcuenca	1
		C1.2	Resolución temporal mínima de salida		Diarias, mensuales, anuales	5	Mensuales, anuales	3	Mensuales, anuales	3
C.2	Robustez	C2.1	Estrategia de calibración		Automática	5	Manual	1	Semiautomática	3
		C2.2	Procesos naturales modelados	Precipitaciones	✓	5	✓	4	✓	4
				Escorrentía superficial	✓		✓		✓	
				Infiltración	✓		✓		✓	
				Evapotranspiración	✓		✓		✓	
				Flujo de aguas subterráneas	✓		✓		✓	
		C2.3	Análisis de escenarios	Prácticas agrícolas	✓	5	2,5	✓	5	
				Uso de suelos	✓			✓		✓
				Climas futuros	✓			✓		✓
				Infraestructura	✓			✓		✓
				Oferta y demanda	✓			✓		✓
				Operaciones	✓			✓		✓
C.3	Accesibilidad	C3.1	Disponibilidad de código		Open source: este es un modelo de código abierto, y su código fuente está disponible públicamente para su acceso y revisión. La comunidad de usuarios y desarrolladores puede acceder al código, realizar mejoras y contribuir al desarrollo continuo del modelo.	5	Open source: este es un modelo de código abierto, y su código fuente está disponible públicamente para su acceso y revisión. La comunidad de usuarios y desarrolladores puede acceder al código, realizar mejoras y contribuir al desarrollo continuo del modelo.	5	Solo ejecutable. El acceso al código fuente está restringido y controlado por la organización desarrolladora. Sin embargo, por medio de API es posible generar modificaciones a las entradas y salidas.	2
		C3.2	Soporte		Alto: canales de asistencia al usuario, tutoriales en línea, una base de conocimientos actualizada y acceso a una línea directa de soporte técnico o chat en vivo, actualizaciones periódicas, parches de seguridad y una comunidad activa de usuarios para intercambiar ideas y solucionar problemas.	5	Bajo-Medio: manual de referencia y manual de usuario, un portal con solución a preguntas no respondido con tanta frecuencia, asistencia por correo electrónico o a través de un formulario de contacto, actualizaciones y mejoras del programa poco frecuentes	2	Medio-alto: manual de referencia y manual de usuario, un portal con solución a preguntas frecuentes, asistencia por correo electrónico o a través de un formulario de contacto, actualizaciones y mejoras del programa menos frecuentes.	3

		C3.3	Recursos humanos y técnicos	Alto: este es un modelo hidrológico y de calidad del agua que requiere un alto nivel de formación y experiencia en hidrología, modelación de cuencas y manejo de datos hidrológicos. El usuario debe tener conocimientos sólidos en el uso de software de SIG y análisis de datos, así como una comprensión profunda de los procesos hidrológicos y la calibración de modelos.	1	Medio: está diseñado para ser más accesible y amigable para usuarios con conocimientos en ciencias ambientales, ecología y manejo de recursos naturales. Así mismo, se espera que los usuarios tengan conocimientos básicos en SIG y manejo de datos geoespaciales para utilizar el modelo de manera efectiva.	3	Medio-alto: es un modelo de planificación y gestión de recursos hídricos que requiere un nivel medio a alto de formación. Los usuarios deben tener conocimientos en hidrología, manejo de recursos hídricos y planificación del uso del agua. A pesar de su interfaz gráfica intuitiva, se espera que los usuarios tengan experiencia en el análisis de datos hidrológicos y la interpretación de resultados para tomar decisiones informadas. Requiere conocimiento y/o manejo de archivos GIS para la comprensión de la interfaz, además, para el proceso de calibración se requiere implementar otras herramientas como Excel o PEST.	4
		C3.4	Nivel de postprocesamiento	Medio: Una vez que se ejecuta el modelo, los resultados necesitan un análisis adicional para su interpretación, que puede involucrar la creación de gráficos, mapas y la comparación con datos reales. Además, los resultados generados a menudo necesitan ajustes o transformaciones para ser presentados de manera comprensible y útil para la toma de decisiones.	3	Medio-bajo: Para visualizar los resultados de InVEST, se requiere un nivel mínimo de postprocesamiento, pues proporciona una variedad de resultados que se pueden visualizar en diferentes formatos, como mapas raster, gráficos y tablas. Para visualizar los resultados de los modelos hidrológicos, es necesario tener acceso a un software de SIG (Sistemas de Información Geográfica) que pueda leer los archivos de salida generados por InVEST	4	Bajo: WEAP proporciona una interfaz gráfica intuitiva para visualizar y analizar los resultados del modelo. Los resultados se presentan en gráficos y tablas dentro de la interfaz, lo que permite a los usuarios explorar y comparar diferentes escenarios y opciones de gestión.	5

Apéndice L. Herramienta utilizada para consultar las preferencias de los usuarios

Formulario de valoración de criterios para la selección de un modelo de producción hídrica idóneo para propósitos de manejo de la cuenca del río Tona

El proyecto “Selección de un modelo de producción hídrica idóneo para propósitos de manejo de una cuenca abastecedora de los Andes colombianos, caso de estudio: Cuenca del Río Tona” tiene como propósito la identificación objetiva de un modelo de producción hídrica que permita la toma de decisiones informadas en esta cuenca hidrográfica, que juega un papel crucial en el suministro de agua potable al área metropolitana de Bucaramanga. Para alcanzar este propósito, se está aplicando la metodología Proceso Analítico Jerárquico (AHP), desarrollado por Thomas Saaty [1].

Un ejercicio de revisión bibliográfica, seguido de un proceso de depuración, llevó a la identificación de los criterios y subcriterios requeridos por el modelo AHP para la selección del modelo de producción hídrica. Posteriormente, se contó con la participación de un grupo de expertos con amplia experiencia en el campo de la modelación hidrológica, quienes asignaron pesos (por relevancia) a los criterios y subcriterios propuestos.

En la fase actual buscamos su apoyo, como usuarios finales de un modelo hidrológico, para realizar una valoración de los diferentes criterios y subcriterios, teniendo en cuenta los recursos y capacidades existentes en su entidad y las necesidades particulares establecidas por la normatividad y su objeto misional.

Apreciado usuario, su participación en este proceso es invaluable para el avance del trabajo propuesto. Agradecemos de antemano el tiempo y esfuerzo que dedique para completar este formulario y, por su participación, nos comprometemos a compartir con ustedes los resultados finales de este ejercicio.

[1] T. L. Saaty, “How to make a decision: the analytic hierarchy process,” *Interfaces* (Providence), vol. 24, no. 6, pp. 19–43, 1994

Consentimiento informado

Por favor, lea esta sección cuidadosamente y, una vez considerados todos los aspectos establecidos, proceda a manifestar su acuerdo o desacuerdo con el consentimiento.

La información recopilada a través de este formulario es confidencial y su único fin es el académico en el marco del desarrollo del trabajo de grado “Selección de un modelo de producción hídrica idóneo para propósitos de manejo de una cuenca abastecedora de los andes colombianos, caso de estudio: Cuenca del Río Tona”, cuya descripción se realizó anteriormente.

La participación en el diligenciamiento de este formulario es completamente voluntaria, no representa riesgos para los participantes, y no tiene asociada una compensación económica. Sin

embargo, los miembros del equipo de trabajo del proyecto se comprometen a compartir los resultados finales del ejercicio realizado con los usuarios que participen en el proceso de valoración de criterios y subcriterios.

La información recolectada en este formulario será guardada y procesada por el equipo investigador para realizar productos como: documentos escritos, artículos, comunicaciones en eventos científicos. La circulación de estos productos se realizará en medios tales como: web, libro impreso, cartillas, revistas, entre otros. Por lo tanto: Deseo participar en el proyecto de investigación de la Universidad Industrial de Santander anteriormente citado. El objetivo me ha sido mencionado claramente y conozco los beneficios y riesgos de mi participación en el proyecto ante lo cual decido que mi participación implique:

Marque todas las casillas que apliquen

- ☐ Ser encuestado.
- ☐ Evaluar criterios y subcriterios de modelación mediante la metodología AHP.
- ☐ Participar en el proceso de selección del modelo de producción hídrica.
- ☐ Permitir que mis aportes sean citados de manera **anónima** en los productos del estudio.
- ☐ Permitir que mis aportes sean citados **con mi nombre** en los productos del estudio.
- ☐ No estoy interesado en participar.

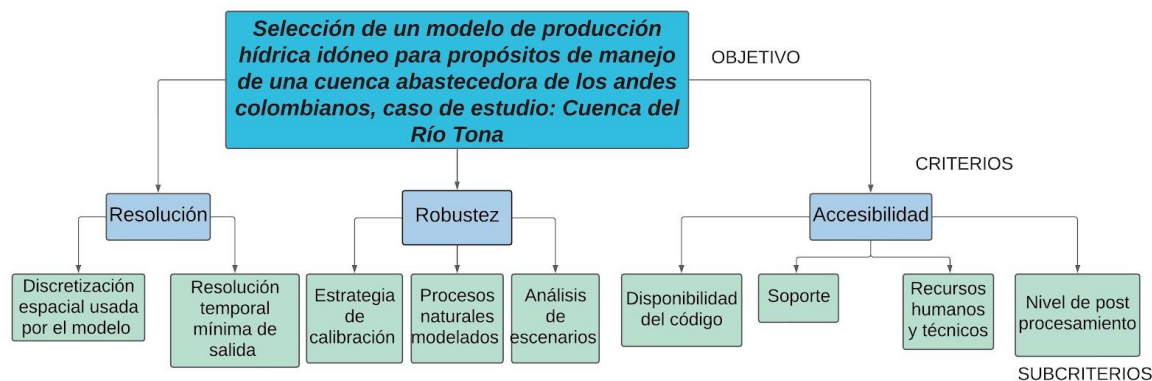
Información importante para la valoración.

A continuación, se presentará: i) el árbol de jerarquía que presenta la estructura de los criterios y subcriterios relevantes para la selección de un modelo de producción hídrica; ii) la definición de los criterios y subcriterios, lo que le permitirá conocer de forma más cercana los aspectos que se están evaluando; y iii) instrucciones para la valoración de cada criterio y subcriterio. Su valoración como usuario será un componente clave en la selección del modelo de

producción hídrica más idóneo para el manejo de la cuenca del Río Tona, por ello es crucial leer y comprender toda la información presentada.

Árbol de jerarquía

La siguiente figura muestra el árbol de jerarquía propuesto para la selección de un modelo de producción hídrica idóneo para propósitos de manejo de la cuenca del río Tona:



Definición de criterios

En la Tabla 1 se encuentra la definición de los criterios seleccionados para el presente estudio.

Criterios	Definición
Resolución	Se refiere a la capacidad del modelo de producción hídrica para capturar y representar adecuadamente la exactitud y detalle espacial y temporal de los procesos hidrológicos.
Robustez	Capacidad del programa para manejar diferentes condiciones y escenarios hidrológicos de manera efectiva y consistente, incluyendo variaciones en los datos, incertidumbres y condiciones extremas.
Accesibilidad	Facilidad de uso del programa, incluyendo una interfaz intuitiva, documentación clara y aprendizaje rápido, para permitir que un amplio rango de usuarios pueda utilizarlo de manera efectiva.

Tabla 1. Definición de criterios.

Definición de los subcriterios

La Tabla 2 muestra la definición de cada subcriterio tenido en cuenta para el proyecto.

Criterios	Subcriterios	Explicación del subcriterio
Resolución	Discretización espacial usada por el modelo	Se refiere a la resolución o tamaño de la mínima unidad utilizada por el modelo para representar la cuenca hidrográfica. Una mayor discretización espacial puede proporcionar mayor detalle, pero puede requerir más datos desconocidos en el sitio de estudio y aumentar la complejidad computacional.
	Resolución temporal mínima de salida	Intervalo o frecuencia de los datos de salida del modelo (diaria, semanal, mensual, anual).
Robustez	Estrategia de calibración	Hace referencia a la herramienta o estrategia utilizada para ajustar los parámetros del modelo y obtener una mejor correspondencia entre las salidas del modelo y los datos observados (automática, semiautomática, manual).
	Procesos naturales modelados	Se refiere a los componentes del ciclo hidrológico que modela (precipitación, evaporación, escorrentía, entre otros).
	Análisis de escenarios	Hace referencia a si el modelo simula escenarios futuros, incorpora los procesos antrópicos relevantes, como la gestión del agua (oferta y demanda) y prácticas agrícolas, el impacto de infraestructuras humanas (represas, canales de riego, etc), y otros factores antropogénicos que puedan afectar el sistema hídrico de la cuenca.
Accesibilidad	Disponibilidad del código	Si cuenta con código abierto, disponible por solicitud o solo ejecutable.
	Soporte	Documentación (manual de referencia, guía de usuario, manual de aplicaciones), canales de asistencia al usuario, una base de conocimientos actualizada y acceso a una línea directa de soporte técnico o chat en vivo, actualizaciones periódicas, parches de seguridad y una comunidad activa de usuarios para intercambiar ideas y solucionar problemas .
	Recursos humanos y técnicos	Se refiere al nivel de conocimiento y habilidades técnicas necesarias para operar y utilizar efectivamente el modelo, esto incorporado a una interfaz gráfica amigable.
	Nivel de postprocesamiento	Evalúa el grado de procesamiento adicional necesario para obtener resultados finales interpretables y listos para su aplicación. Algunos modelos pueden requerir un mayor nivel de postprocesamiento, lo que puede implicar más tiempo y esfuerzo por parte del usuario.

Tabla 2. Definición de subcriterios.

INICIO DE LA VALORACIÓN

Lea cuidadosamente cada criterio y subcriterio proporcionado en el formulario de evaluación. Utilice la escala presentada en la Tabla 3 para asignar su preferencia relativa.

Considere los siguientes aspectos al realizar la asignación de preferencias:

- El conocimiento que tiene de las capacidades y recursos existentes en su entidad. Por ejemplo, la densidad espacial de estaciones hidroclimáticas existentes y planeadas, la resolución espacial y temporal de insumos que produce la entidad, necesarios para la modelación hidrológica (mapas de suelo, uso y cobertura del suelo, etc), la experticia técnica para operar el modelo hidrológico del personal que trabaja en la entidad.
- Las necesidades de información asociadas a la normatividad aplicable y misión de su entidad. Por ejemplo, la entidad requiere reportar indicadores hidrológicos a escala diaria, mensual o anual; la entidad requiere conocer el balance hídrico de la cuenca en diferentes áreas de drenaje o solo en puntos de cierre específicos.

Puntuación	Nivel de preferencia	Definición
5	Preferencia muy alta	Muy importante
4	Preferencia alta	Bastante importante
3	Preferencia media	Ni importante ni no importante
2	Preferencia baja	Poco importante
1	Preferencia muy baja	No es importante

Tabla 3. Escala de preferencia

En caso de tener alguna duda sobre el proceso, o pregunta específica, no dude en expresarla.

VALORACIÓN DE CRITERIOS

Definición de la importancia de los criterios

Criterios	Definición	Nivel de preferencia	Justificación
Resolución	Se refiere a la capacidad del modelo de producción hídrica para capturar y representar adecuadamente la exactitud y detalle espacial y temporal de los procesos hidrológicos.		

Robustez	Se refiere a la capacidad del programa para manejar diferentes condiciones y escenarios hidrológicos de manera efectiva y consistente, incluyendo variaciones en los datos, incertidumbres y condiciones extremas.		
Accesibilidad	Se refiere a la facilidad de uso del programa, incluyendo una interfaz intuitiva, documentación clara y aprendizaje rápido, para permitir que un amplio rango de usuarios pueda utilizarlo de manera efectiva.		

VALORACIÓN DE SUBCRITERIOS

Definición de la importancia de los subcriterios, criterio: Resolución.

Criterios	Subcriterios	Explicación del subcriterio	Nivel de preferencia	Justificación de la preferencia
Resolución	Discretización espacial usada por el modelo	Se refiere a la resolución o tamaño de la mínima unidad utilizada por el modelo para representar la cuenca hidrográfica. Una mayor discretización espacial puede proporcionar mayor detalle, pero puede requerir más datos desconocidos en el sitio de estudio y aumentar la complejidad computacional (ejemplos de discretización espacial: cuenca, subcuenca, HRU, pixel). Preferencia “5” equivale a que se prefiere una muy alta resolución, y “1” a que la resolución disponible le es indiferente.		
	Resolución temporal mínima de salida	Se refiere al intervalo o frecuencia de los datos de salida del modelo (ejemplos de intervalos de salida: diaria, semanal, mensual, anual). Preferencia “5” equivale a que se prefiere una muy alta resolución, y “1” a que la resolución disponible le es indiferente.		

Definición de la importancia de los subcriterios, criterio: Robustez.

Criterios	Subcriterios	Explicación del subcriterio	Nivel de preferencia	Justificación de la preferencia
Robustez	Estrategia de calibración	Hace referencia a la herramienta o estrategia usada para ajustar los parámetros del modelo y		

		obtener una mejor correspondencia entre las salidas del modelo y los datos observados (ejemplos de estrategias de calibración: automática, semiautomática, manual). Preferencia “5” equivale a que se prefiere una estrategia de calibración especializada, “1” se refiere a que la estrategia de calibración le es indiferente.		
	Procesos naturales modelados	Se refiere a los procesos del ciclo hidrológico que modela (precipitación, escorrentía, evaporación, evapotranspiración, flujo subsuperficial, flujo subterráneo). Preferencia “5” se refiere a que está interesado en que se modelen extensivamente todos los procesos del ciclo hidrológico, “1” se refiere a que le es indiferente qué procesos y a qué nivel de detalle se modelan.		
	Análisis de escenarios	Hace referencia a si el modelo simula escenarios futuros, incorpora procesos antrópicos relevantes como la gestión del agua (oferta y demanda), y prácticas agrícolas, el impacto de infraestructuras humanas (represas, canales de riego, etc.) y otros factores antropogénicos que puedan afectar el sistema hídrico de la cuenca. Preferencia “5” se refiere a que está interesado en que el modelo incorpore todos los aspectos posibles, “1” se refiere a que no le interesa el análisis de escenarios.		

Definición de la importancia de los subcriterios, criterio: Accesibilidad.

Criterios	Subcriterios	Explicación del subcriterio	Nivel de preferencia	Justificación de la preferencia
Accesibilidad	Disponibilidad del código	Se refiere a si existe un código abierto que permita la edición/modificación de las ecuaciones y modelos usados (algunos modelos tienen código abierto, otros lo hacen disponible por solicitud y otros ofrecen solo un archivo ejecutable). Preferencia “5” equivale a que se prefiere el acceso a un código abierto, “1” se refiere a que este criterio le es indiferente.		
	Soporte	Se refiere a si existe documentación (manual de referencia, guía de usuario, manual de aplicaciones), canales de asistencia al usuario, una base de conocimientos actualizada y acceso a una línea directa de soporte técnico o chat en vivo, actualizaciones periódicas, parches de seguridad, y una comunidad activa de usuarios para intercambiar ideas y solucionar problemas. Preferencia “5” equivale a que se prefiere un modelo con todo el soporte posible, “1” se refiere a que este criterio le es indiferente.		

	Recursos humanos y técnicos	Se refiere al nivel de conocimiento y habilidades técnicas para operar y utilizar efectivamente el modelo; esto sumado a la preferencia por una interfaz gráfica amigable. Preferencia “5” equivale a que se prefiere un modelo que no requiera altos recursos humanos y técnicos para su operación, y que adicionalmente cuente con una interfaz gráfica amigable. Preferencia “1” equivale a que se cuenta con todos los recursos humanos y técnicos para operar un modelo, y la interfaz gráfica le es indiferente.		
	Nivel de post-procesamiento	Se refiere al grado de procesamiento adicional necesario para obtener resultados finales interpretables y listos para su aplicación. Algunos modelos pueden requerir un mayor nivel de postprocesamiento, lo que puede implicar más tiempo y esfuerzo por parte del usuario final. Preferencia “5” equivale a que se prefiere un modelo que no requiera postprocesamiento, “1” se refiere a que este criterio le es indiferente.		

Agradecimientos

Agradecemos el tiempo y esfuerzo que dedicó para completar este formulario y, por su participación, nos comprometemos a compartir con ustedes los resultados finales de este ejercicio.

Nombre:

Fecha:

Entidad que representa:

Apéndice M. Correo agradecimiento a expertos

Asunto: Agradecimiento por participación en Encuesta AHP - Modelación Hídrica

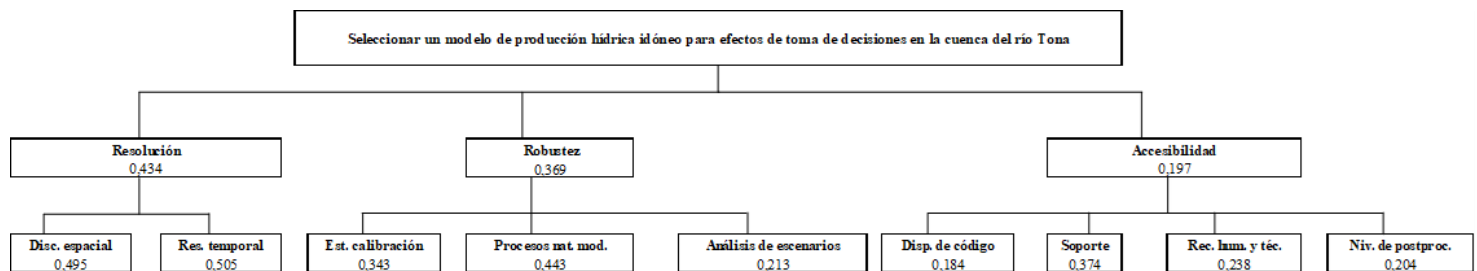
Buen día, Profesor(a).

Queríamos expresar nuestro agradecimiento por su valiosa contribución a nuestro proyecto.

Su experiencia ha sido esencial para la correcta continuidad de este.

Parte fundamental en el proceso del AHP es el análisis de consistencia, y gracias a las respuestas completas que ha proporcionado, se ha obtenido una consistencia adecuada para lograr asignar pesos a los criterios que enmarcan este estudio.

Adjunto encontrará el árbol de jerarquía con los respectivos pesos ponderados.



Sinceramente,

J. Andrew Quintero Cárdenas, Andrés F. Rondón Ch.

Est. Ingeniería Civil

UIS

