

**MODELO BASADO EN CONOCIMIENTO PARA LA PLANEACIÓN
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS CON EL USO DE
INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

Viviana Vargas Franco

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE RECURSOS LOS
NATURALES Y DEL AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI-COLOMBIA
2014**

**MODELO BASADO EN CONOCIMIENTO PARA LA PLANEACIÓN
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS CON EL USO DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL**

VIVIANA VARGAS FRANCO

Tesis presentada como requisito para optar al título de Doctor en Ingeniería.
Área de Énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental

Directora:

Ing. INÉS RESTREPO TARQUINO, PhD.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS
NATURALES Y DEL AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI-COLOMBIA**

2014

Nota de aceptación:

Ing. INÉS RESTREPO TARQUINO, PhD.

Directora de Tesis

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Santiago de Cali, Agosto de 2014

A mis hijos Diana y David, por su amor,
apoyo y comprensión

A mis padres Alfonso Vargas (q.e.p.d.)
Y Ofelia Franco, por sus
sabias enseñanzas y ejemplo

A mis hermanos Alfonso, Rolando, Pilar,
Edgar y Alexander, por estar siempre ahí

A mis sobrinos Lina, Angie, Sebastián y
Felipe

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a las diversas personas; proyectos e instituciones que hicieron posible que este trabajo de investigación se desarrollara:

- PhD. Inés Restrepo Tarquino. Directora de este trabajo de investigación del Instituto CINARA de la Universidad del Valle, por su invaluable orientación, su constante apoyo y su gestión para el desarrollo de esta tesis de doctorado.
- PhD. Martha Millán, Escuela de Ciencias de la Computación. Universidad del Valle.
- Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira.
- Instituto CINARA de la Universidad del Valle.
- Programa de Postgrado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle.
- Estudiantes de la Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental Universidad del Valle.
- Compañeros del Programa de Doctorado de Ingeniería de la Universidad del Valle.
- Compañeros del Grupo Gestión Integrada del Recurso Hídrico del Instituto Cinara de la Universidad del Valle
- Integrantes del Grupo de Gestión Integral del Recurso Hídrico del Instituto CINARA de la Universidad del Valle.
- Ing. Raúl Rojas Herrera. Ingeniero de Sistemas. Universidad del Valle.
- Mat. Eider Leandro Arcila Dager. Matemático. Universidad del Valle.
- Est. Lina Marcela Sarasti Vargas. Estudiante Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira.

Esta investigación conto con el apoyo financiero de los siguientes proyectos:

- Compañeros del Proyecto “Desarrolló de un modelo para la gestión integrada del recurso hídrico que promueva la equidad, la reducción de la pobreza y el desarrollo del país, bajo el concepto de desarrollo sostenible – GIRH”. Proyecto financiado por Colciencias y ejecutado por el Instituto CINARA de la Universidad del Valle, la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) y el grupo CIDSE de la Universidad del Valle.

RESUMEN

Esta tesis de doctorado propone un modelo conceptual y operativo para el apoyo a la toma de decisiones en un proceso de planeación de una cuenca hidrográfica (CH) a través de la gestión de conocimiento. El modelo conceptual incluye un conjunto de conceptos fundamentales vinculados al sistema cuenca hidrográfica donde se representa un cuerpo de conocimiento basado en los conceptos más recientes sobre la planeación de cuencas hidrográficas. A través de la gestión de conocimiento se tipifican los principales problemas en cada uno de los subsistemas definidos en el sistema cuenca hidrográfica. Se construye un modelo basado en conocimiento y un prototipo en Web de sistema de apoyo a las decisiones, denominado *cuencandina*, integrando los modelos de lógica difusa y los indicadores de presión, estado, respuesta. El prototipo *cuencandina* se aplica en una microcuenca andina de la cuenca alta del Río Cauca en su paso por el Departamento del Valle del Cauca, Colombia. El modelo conceptual y el sistema de apoyo a las decisiones son un aporte fundamental en el proceso de planeación de cuencas hidrográficas.

Palabras clave: Planeación de cuencas hidrográficas, Gestión de conocimiento, Sistema soporte a la decisión, sistemas computacionales en Web.

ABSTRACT

This dissertation proposes a conceptual and operational model to support decision making in the process of planning a watershed through knowledge management. The conceptual model includes a set of fundamental concepts related to watershed where a body of knowledge based on the latest concepts of watershed planning system is shown. Through knowledge management the main problems are typified in each of the subsystems defined in the watershed system. Knowledge-based model and a prototype system of Web-based Decision Support, called *cuencandina* integrate fuzzy logic models and indicators of pressure, state, response are built. The prototype applies *cuencandina* in an Andean watershed of the Upper Cauca River in its passage through the Department of Valle del Cauca, Colombia. The conceptual model and support system decisions are a critical input in the planning process of watershed management.

Keywords: watershed planning, knowledge management, decision support system, Web computer systems.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO GENERAL	2
1.1 CRISIS DEL AGUA.....	2
1.1.1 Crisis del agua a nivel mundial.....	2
1.1.2 Crisis del agua en Colombia.....	3
1.1.3 Crisis del agua en la región andina colombiana.....	4
1.2 TOMA DE DECISIONES EN LA PLANEACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS.....	5
1.2.1 Toma de decisiones en la planeación de los recursos hídricos a nivel mundial.....	5
1.2.2 Toma de decisiones en la planeación de los recursos hídricos en Colombia	9
1.3 DESAFÍOS DE CONOCIMIENTO	17
1.4 OBJETIVOS.....	18
1.4.1 Objetivo general	18
1.4.2 Objetivos específicos	18
1.5 COMPONENTES METODOLÓGICOS GENERALES	19
1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.6.1 Alcances.....	20
1.6.2 Limitaciones.....	20
2. GESTIÓN DE CONOCIMIENTO PARA CARACTERIZAR LOS PROBLEMAS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN COLOMBIA.....	20
2.1 INTRODUCCIÓN.....	21
1.1. REVISIÓN DE LITERATURA	21
2.2.1 Sistema cuenca hidrográfica.....	21
2.2.4 Problemas en las cuencas hidrográficas de Colombia.....	21
2.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
2.4 RESULTADOS.....	25
2.4.1 El sistema cuenca hidrográfica y sus componentes	25
2.4.2 Tipificación de problemas en una cuenca hidrográfica en Colombia por subsistema	27

2.4.2.1	Problemas en el subsistema biofísico-aire.....	27
2.4.2.2	Problemas en el subsistema biofísico-suelo	28
2.4.2.3	Problemas en el subsistema biofísico-agua	29
2.4.2.4	Problemas en el subsistema biodiversidad y ecosistemas	31
2.4.2.5	Problemas en el subsistema social.....	31
2.4.2.6	Problemas en el subsistema político	32
2.4.2.7	Problemas en el subsistema económico	33
2.4.2.8	Problemas en el subsistema cultural	34
2.4.2.9	Problemas en el subsistema legal	35
2.4.2.10	Problemas en el subsistema tecnológico	36
2.4.2.11	Problemas en el subsistema institucional.....	37
2.4.2.12	Problemas en el subsistema productivo	38
2.4.2.13	Problemas en el subsistema conocimiento e información	39
2.5	EVALUACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL SISTEMA CUENCA	
	HIDROGRÁFICA	40
2.6	DISCUSIÓN.....	41
2.7	CONCLUSIONES	42
3.	PROPUESTA DE UN MODELO CONCEPTUAL PARA LA PLANEACIÓN DE	
	UNA CUENCA HIDROGRÁFICA.....	44
3.1	INTRODUCCIÓN.....	44
3.2	REVISIÓN DE LITERATURA	44
3.2.1	Modelos conceptuales.....	44
3.2.2	Modelos conceptuales para la planeación de cuencas hidrográficas.....	44
3.2.2	El proceso de planeación de cuencas hidrográficas	46
3.3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	47
3.4	RESULTADOS.....	48
3.4.1	Modelo conceptual para la planeación de una Cuenca Hidrográfica	48
3.4.1.1	Desarrollo Sustentable (DS) para la gestión del agua	49
3.4.1.2	Producción limpia y consumo sostenible (PLCS) en la gestión del agua.....	50
3.4.1.3	Educación ambiental (EA) en la gestión del agua	51
3.4.1.4	Cultura del agua (CA).....	51
3.4.1.5	Gestión del conocimiento (GC) para la gestión del agua	52

3.4.1.6	Servicios ecosistémicos (SE) en una cuenca hidrográfica.....	52
3.4.1.7	Cambio climático (CC) y variabilidad climática en la gestión del agua.....	53
3.4.1.8	Monitoreo eco-ambiental (MEA) en la planeación de CH.....	53
3.4.1.9	Ordenamiento ecológico territorial (OET) en cuencas hidrográficas.....	54
3.4.1.10	Gestión del riesgo ambiental (GRA) en la gestión del agua	55
3.4.1.11	Gobernanza del agua (GA).....	55
3.4.1.12	Institucionalidad para la gestión del agua	56
3.4.1.13	Participación comunitaria (PC) para la gestión del agua	56
3.4.1.14	Uso eficiente del agua (UEA)	57
3.4.1.15	Herramientas económicas (HE) para la planeación de CH	58
3.4.1.16	Herramientas metodológicas (HM) para la planeación de CH.....	58
3.4.2	Estrategias para la planeación de una cuenca hidrográfica.....	59
3.4.2.1	Escala de planeación espacial: de la microcuenca a la gran cuenca.....	59
3.4.2.2	Escala de planeación temporal: intervenciones de corto a largo plazo.....	60
3.4.2.3	Variación espacial; de la cuenca alta a la cuenca baja	60
3.4.2.4	Variación temporal: de minutos a décadas.....	60
3.4.3	El sistema de planeación de una cuenca hidrográfica	61
3.4.3.1	Subsistema organizativo de planeación.....	62
3.4.3.2	Subsistema de conocimiento	63
3.4.3.3	Subsistema de monitoreo y evaluación	63
3.5	DISCUSIÓN.....	63
3.6	CONCLUSIONES	65
4.	<i>MODELO BASADO EN CONOCIMIENTO (MBC) PARA EL APOYO A LA PLANEACIÓN DE MICROCUENCAS ANDINAS</i>	<i>66</i>
4.1	INTRODUCCIÓN.....	66
4.2	REVISIÓN DE LITERATURA	66
4.2.1	Modelos basados en conocimiento (MBC)	66
4.2.2	Aplicación de modelos basados en conocimiento.....	67
4.2.3	Modelo presión-estado-respuesta (PER).....	67
4.2.4	Modelo de lógica difusa.....	69
4.3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	70
4.4	RESULTADOS.....	74

4.4.1	Definición de indicadores presión-estado-respuesta (PER).....	74
4.4.2	Definición de funciones de pertenencia de la lógica difusa.....	77
4.4.3	Definición de reglas de decisión.....	78
4.4.4	Intervenciones recomendadas para una microcuenca andina	81
4.5	DISCUSIÓN.....	82
4.6	CONCLUSIONES	84
5.	<i>PROTOTIPO WEB DE UN SISTEMA SOPORTE A LAS DECISIONES (SSD)</i>	
	<i>PARA LA PLANEACIÓN DE MICROCUENCAS ANDINAS – CUENCANDINA.....</i>	86
5.1	INTRODUCCIÓN.....	86
5.2	REVISIÓN DE LITERATURA	86
5.2.1	Herramientas para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos.....	86
5.2.2	Sistemas soporte a la decisión (SSD) aplicados a la gestión de los recursos hídricos.....	88
5.2.3	Sistemas soporte a la decisión basados en conocimiento (SBC) en recursos hídricos	90
5.2.4	Sistemas soporte a la decisión en recursos hídricos operando en Web	91
5.2	MATERIALES Y MÉTODOS.....	92
5.4	RESULTADOS.....	95
5.4.1	Sistema soporte a la decisión basado en conocimiento en Web <i>cuencandina</i>	95
5.4.2	Módulo administración de cuencas hidrográficas.....	97
5.4.3	Módulo base de conocimiento.....	99
5.4.4	Módulo mi cuenta.....	102
5.4.5	Módulo administración de usuarios	103
5.5	DISCUSIÓN.....	103
5.6	CONCLUSIONES	105
6.	<i>APLICACIÓN DEL PROTOTIPO CUENCANDINA EN LA MICROCUENCA</i>	
	<i>ANDINA EL CHOCHO. VALLE DEL CAUCA. COLOMBIA</i>	107
6.1	INTRODUCCIÓN.....	107
6.2	MATERIALES Y MÉTODOS.....	107
6.2.1	Zona de estudio	107
6.2.2	Aplicación del SSD <i>cuencandina</i>	109

6.3	RESULTADOS.....	109
6.3.1	Principales problemas en la microcuenca andina el Chocho.....	109
6.3.2	Resultados de la aplicación del prototipo <i>cuencandina</i>	112
6.3	DISCUSIÓN.....	118
6.4	CONCLUSIONES	120
7.	CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS	121
7.1	CONCLUSIONES	122
7.2	ESTUDIOS FUTUROS	127
8.	BIBLIOGRAFÍA	128
9.	ANEXOS.....	143

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Vectores propios de cuatro primeros componentes de 13 subsistemas evaluados.	40
Tabla 4. 1	Resumen de los principales problemas en una cuenca hidrográfica en Colombia.	72
Tabla 4. 2	Indicadores de PER definidos para el subsistema biofísico.	74
Tabla 4. 3	Indicadores de PER definidos para el subsistema socio-económico.....	76
Tabla 4. 4	Indicadores PER definidos para el subsistema político-institucional.	77
Tabla 4. 5	Indicadores de PER definidos para el subsistema tecnológico.....	78
Tabla 4. 6	Reglas de decisión para el valor de presión del índice ICAsup	79
Tabla 4. 7	Reglas de decisión para el valor de estado del índice ICAsup	80
Tabla 4. 8	Reglas de decisión para el valor de respuesta del índice ICAsup	80
Tabla 4. 9	Reglas de decisión para el índice ICAsup	81
Tabla 4. 10	Intervenciones para la zona alta en una microcuenca andina por el índice ICASup ...	82
Tabla 6. 1	Principales problemas por subsistemas en la microcuenca andina el Chocho.....	113
Tabla 6. 2	Resumen del valor de los índices evaluados en la microcuenca el Chocho.	116
Tabla 6. 3	Intervenciones por índice ICASup para la zona alta de la microcuenca el Chocho....	118
Tabla 6. 4	Intervenciones por índice ICC para la zona alta de la microcuenca andina el Chocho	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Conceptos y metodologías utilizadas en la construcción del modelo conceptual	19
Figura 2.1	Procesos para la caracterización de los problemas en una CH en Colombia.	24
Figura 2.2	Representación esquemática del sistema cuenca hidrográfica y sus subsistemas.	26
Figura 2.3	Ponderación de la importancia de los subsistemas en una CH en Colombia.	27
Figura 2.4	Intervalos de confianza para la ponderación de subsistemas en CH en Colombia.	27
Figura 2.5	Principales problemas en el subsistema biofísico-aire en una CH en Colombia.	28
Figura 2.6	Principales problemas en el subsistema biofísico-suelo en una CH en Colombia.	29
Figura 2.7	Principales problemas caracterizados en el subsistema biofísico-agua.	30
Figura 2.8	Principales problemas caracterizados en el subsistema biodiversidad y ecosistemas.	31
Figura 2.9	Principales problemas caracterizados en el subsistema social.	32
Figura 2.10	Principales problemas caracterizados en el subsistema político.	33
Figura 2.11	Principales problemas caracterizados en el subsistema económico.	34
Figura 2.12	Principales problemas caracterizados en el subsistema cultural.	35
Figura 2.13	Principales problemas caracterizados en el subsistema legal.	36
Figura 2.14	Principales problemas caracterizados en el subsistema tecnológico.	36
Figura 2.15	Principales problemas caracterizados en el subsistema institucional.	37
Figura 2.16	Principales problemas caracterizados en el subsistema productivo.	38
Figura 2.17	Principales problemas caracterizados en el subsistema conocimiento e información.	39
Figura 2.18	Nueva definición del sistema cuenca hidrográfica y sus principales componentes ...	41
Figura 3.1	Modelo conceptual propuesto para la planeación de cuencas hidrográficas.	49
Figura 3.2	Esquema del proceso de PCH como un sistema basado en gestión de conocimiento.	62
Figura 4.1	Modelo Presión, Estado, Respuesta (PER) para el modelo <i>cuencandina</i>	71
Figura 4.2	Estructura conceptual de un modelo de lógica difusa.	73
Figura 4.3	Esquema metodológico del modelo <i>cuencandina</i>	74
Figura 4.4	Funciones de pertenencia de indicadores PER para el índice ICA_{sup}	79
Figura 5.1	Esquema de la arquitectura de un sistema basado en conocimiento (Liao, 2005).	93
Figura 5.2	Esquema de la arquitectura del prototipo computacional <i>cuencandina</i> (Rojas, 2011).	95
Figura 5.3	Interfaz de inicio al prototipo SSD-BC-Web <i>cuencandina</i>	96
Figura 5.4	Interfaz de acceso a los módulos del SSD-BC-Web <i>cuencandina</i>	96
Figura 5.5	Esquema del submenú cuencas del prototipo <i>cuencandina</i>	97

Figura 5.6	Campos para selección de la cuenca, la zona y el subsistema a evaluar.....	98
Figura 5.7	Formulario de entrada de datos y conocimiento al sistema <i>cuencandina</i>	98
Figura 5.8	Esquema general del sistema de administración de informes	99
Figura 5.9	Submenu de base de conocimiento para la administración de temas.	100
Figura 5.10	Formulario para definición de variables y funciones de pertenencia.	101
Figura 5.11	Esquema del formulario para la definición y administración de reglas de decisión...	102
Figura 6.1	Ubicación geográfica de la microcuenca el Chocho (Domínguez y Corrales, 2006).	108
Figura 6.2	Nivel de erosión en la microcuenca el Chocho (Domínguez y Corrales, 2006)	110
Figura 6.3	Registro fotográfico de los principales problemas de la microcuenca el Chocho.	112
Figura 6.4	Ingreso de datos de la microcuenca el Chocho <i>cuencandina</i> , para la zona alta.....	114
Figura 6.5	Valores del índice ICASup para la zona alta de la microcuenca el Chocho.	115
Figura 6.6	Valores del índice IDS para la zona alta de la microcuenca el Chocho.	115
Figura 6.7	Valores de los 6 índices evaluados en la microcuenca baja.....	116
Figura 6.8	Reporte pdf del sistema de apoyo a las decisiones <i>cuencandina</i>	117

LISTA DE ANEXOS

Anexo 4.1	Funciones de pertenencia de indicadores PER para el índice IDS	143
Anexo 4.2	Funciones de pertenencia de indicadores PER para el índice ICC	144
Anexo 4.3	Funciones de pertenencia de indicadores PER para el índice IGBA	145
Anexo 4.4	Funciones de pertenencia de indicadores PER para el índice IEDCA	146
Anexo 4.5	Funciones de pertenencia de indicadores PER para el índice IDIC	147
Anexo 4.6	Ejemplo de cálculos del modelo de lógica difusa.	148
Anexo 4.7	Reglas de inferencia para el índice de degradación del suelo IDS	153
Anexo 4.8	Reglas de inferencia para el índice de cambio climático ICC	154
Anexo 4.9	Reglas de inferencia para el índice de gobernanza del agua IGBA	156
Anexo 4.10	Reglas de inferencia para el índice educación y cultura del agua IEDCA	159
Anexo 4.11	Reglas de inferencia para el índice de datos, información y conocimiento IDIC	161
Anexo 6.1	Formato para el modelo <i>cuencaandina</i> en la microcuenca el Chocho.	164

INTRODUCCIÓN

La crisis del agua es una de las manifestaciones del nivel de agotamiento de los recursos naturales que se ha venido agudizando en este siglo. La planeación y toma de decisiones para la gestión de los recursos hídricos en una cuenca hidrográfica (CH) es un proceso complejo debido a la diversidad de factores que intervienen en él, entre los que se encuentran: variaciones demográficas, migraciones de población, desarrollo industrial y económico, expansión del riego en la agricultura, agricultura extensiva, variaciones en el uso del suelo, turismo, cambio climático, fenómenos meteorológicos extremos, gestión del conocimiento y de gobernabilidad.

Como un apoyo a la toma de decisiones para la planeación de cuencas hidrográficas esta tesis de doctorado propone un modelo conceptual y un sistema soporte a las decisiones (SSD) para el apoyo a la toma de decisiones en un proceso de planeación de una microcuenca andina a través de la gestión de conocimiento, la aplicación del enfoque sistémico, la definición de índices que integran lógica difusa e indicadores de presión, estado y respuesta y la aplicación de técnicas de programación en Web.

Esta investigación se desarrolló en el marco del proyecto “Desarrolló de un modelo para la gestión integrada del recurso hídrico que promueva la equidad, la reducción de la pobreza y el desarrollo del país, bajo el concepto de desarrollo sostenible – GIRH”. Proyecto financiado por Colciencias y ejecutado por el Instituto CINARA de la Universidad del Valle, la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) y el grupo CIDSE de la Universidad del Valle

La tesis está organizada por capítulos autocontenidos que siguen la siguiente estructura: introducción, revisión de literatura, materiales y métodos, resultados, discusión y conclusiones. El primer capítulo denominado marco general, incluye una revisión de literatura general en temas de interés para el trabajo de investigación, los objetivos, una metodología general y los alcances y limitaciones de la investigación. El capítulo 2 contiene la tipificación de los principales problemas en una CH en Colombia, el capítulo 3 presenta la propuesta de un modelo conceptual para la planeación de una CH, el capítulo 4 presenta un modelo basado en conocimiento para el apoyo a la planeación de microcuencas andinas, el capítulo 5 presenta el desarrollo de un prototipo Web de un sistema soporte a las decisiones (SSD) denominado *cuencandina*, el capítulo 6 presenta una aplicación del SSD *cuencandina* a la microcuenca el Chocho y por último está el capítulo 7 de conclusiones y futuros estudios.

1. MARCO GENERAL

1.1 CRISIS DEL AGUA

1.1.1 Crisis del agua a nivel mundial

El agua es fundamental para la producción agrícola, los presupuestos de carbono y otros ciclos biogeoquímicos, la biodiversidad, la generación de energía, la producción industrial y la salud humana (Harding *et al.*, 2014); aporta a las sociedades valores paisajísticos, estéticos, espirituales, psicológicos, culturales y de salud, entre otros (Pardo, 2003). El agua es probablemente el único recurso natural que se halla presente en cada uno de los aspectos de la civilización humana (OMS, 2003); además es un recurso finito y vulnerable (Iacob, 2013). Sin embargo, hay fuertes presiones sobre el agua disponible en muchas regiones del mundo, debido a una demanda en aumento por el crecimiento de la población, el desarrollo económico (Martínez, 2007) y por los impactos potenciales del cambio climático (Harding *et al.*, 2014; Iacob, 2013).

Los recursos (De y Bezuglov, 2006; Oliver *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2010) hídricos globales son limitados y se encuentran distribuidos de forma inequitativa por lo que se plantean grandes retos frente a la falta progresiva del agua y su contaminación. Esta presión tiene umbrales que, si son alcanzados, darán lugar a daños graves, irreversibles, difícilmente recuperables, no lineales y sinérgicos (Martínez, 2005). La velocidad de presión, contaminación y degradación de los recursos hídricos es superior a la velocidad de la definición, implementación y evaluación de intervenciones de control, manejo, restablecimiento y prevención (Arrojo *et al.*, 2007).

La situación del agua condensa el grave problema ambiental contemporáneo en el mundo: se trata de un elemento escaso en la medida que menos del 1% del total del agua del planeta es agua dulce disponible (Iacob, 2013) y está afectada por diversos fenómenos antrópicos, tales como: sobreexplotación de acuíferos, contaminación por depósitos de aguas residuales sin tratamiento en ríos y arroyos, uso de millones de kilos de herbicidas e insecticidas, deforestación, pérdida de la mitad de las tierras húmedas del mundo, elevado consumo de bienes y servicios ecosistémicos, cambio climático, que será responsable de alrededor del 20% del incremento de la escasez global del agua, y conflictos por el uso del suelo y el agua (Colmenares, 2007; GWP y INBO, 2009; Nannette, 2003; OMM y PNUMA, 2008; Prieto, 2004; UN-WATER, 2009; UNESCO-WWAP, 2003; Xercavins *et al.*, 2005). En los próximos decenios, la demanda de agua alcanzará niveles tales que su abastecimiento será cada vez más difícil, se incrementarán su contaminación y el estrés hídrico (GWP y INBO, 2009; PNUD, 2006; PNUMA, 2006; Prieto, 2004; UN-WATER, 2009; WWAP, 2006). Por su importancia en el desarrollo de la humanidad, el agua debe ser gestionada con racionalidad, eficiencia y equidad (Guaita y Jiménez, 2008).

La planeación de los recursos hídricos a través de la toma de decisiones en las cuencas hidrográficas (CH) ha tenido un papel importante en la prestación y conservación de las diversas funciones socio-ambientales que ofrecen y que son vitales para la sociedad. Las cuencas hidrográficas son los espacios físicos naturales para la organización de la evaluación y gestión de los impactos humanos sobre el medio ambiente (Mayer *et al.*, 2014). Una CH es la unidad para evaluar intervenciones en el manejo de recursos naturales, realizar análisis biofísico de los sistemas de agua y análisis de interacciones con el medio social. Sin embargo, los procesos mediante los cuales las variables biofísicas y sociales afectan a los sistemas de agua son complejas y varían espacial y temporalmente, lo que complica los esfuerzos para comprender las relaciones y prácticas para conservar los recursos naturales en general y los recursos hídricos en particular. Adicionalmente, los crecientes impactos hacen que las cuencas hidrográficas están sometidas a varios riesgos ambientales que afectan su gestión y sostenibilidad (Tiburan *et al.*, 2013). La gestión de las cuencas hidrográficas implica la búsqueda permanente de un equilibrio entre las necesidades de los seres humanos y la naturaleza, tanto para las presentes como las futuras generaciones (Said *et al.*, 2006). Un manejo de cuencas exitosa debe tener medidas cuantitativas y cualitativas evaluar la sostenibilidad física, social y económica (Said *et al.*, 2006).

1.1.2 Crisis del agua en Colombia

Colombia es considerado uno de los países con mayor disponibilidad de recursos hídricos, según el estudio nacional del agua (ENA) la oferta hídrica del país es seis veces superior a la oferta mundial y tres veces mayor que la latinoamericana (IDEAM, 2010). Sin embargo, la situación es preocupante ante escenarios de aumento poblacional, cambio climático y contaminación acelerada de los cuerpos de agua. En Colombia, cada año precipitan 3.400 km³ de agua, se evaporan 1.100 km³ y escurren 2.300 km³ (Domínguez, 2005), cantidad aparentemente suficiente pero que, podría reducirse a 1.890 m³/persona/año alrededor del año 2020, si no se adoptan y ejecutan decisiones adecuadas. En 1998, los colombianos contaban con una disponibilidad anual de agua per cápita de casi 60.000m³/habitante/año, esta cifra, para el año de 2003 disminuyó a 40.000m³/habitante/año, es decir el 33%. La disponibilidad mencionada aún no es crítica (1.000 m³/habitante/año), sin embargo la intensidad con que se reduce sí es alarmante. De seguir la tendencia actual, el valor crítico se alcanzaría en el lapso aproximado de 40 años (Domínguez *et al.*, 2008).

Para diversos autores (Contraloría, 2007; He, 2013; Ojeda y Arias, 2000), la crisis del agua en el país también se refleja en su alta contaminación, debido a causas como: alta presencia de sedimentos por deforestación y deterioro de suelos, vertimiento de aguas residuales sin tratamiento, falta de información y conocimiento relacionada con el recurso hídrico, urbanización, desecación de humedales, poca cultura ciudadana frente a la protección del recurso y uso ineficiente del agua potable, evidenciado por altos niveles de pérdidas de agua en acueductos, riego e industria. De igual forma, la brecha entre oferta y demanda de

agua se va estrechando; de acuerdo con los índices de escasez (IDEAM, 2001): en 1996, el 11% de la población (localizada en 22 municipios) presentó un índice de escasez mayor al 20% y para el 2016 se espera que el 51.5% de la población acuse un índice de escasez mayor del 20%. Estos datos reflejan el grave problema de los recursos hídricos en el país, por lo cual se requieren estrategias integradas de planeación que apoyen la toma de decisiones con el fin de mejorar estas condiciones.

1.1.3 Crisis del agua en la región andina colombiana

Con relación a los recursos hídricos, la región andina colombiana presenta diversas problemáticas: rendimiento hídrico deficitario, mayores índices de contaminación ambiental y degradación hídrica del país, mayores presiones por crecimiento poblacional, desarrollo económico e impacto por cambio climático, que se reflejan en el índice de presión hídrica, con valores en esta zona entre *muy alto* y *alto* (IDEAM, 2010). Esta región se encuentra en proceso de alteración, debido a efectos perjudiciales provocados por transporte de sedimentos, carga orgánica y alta incidencia de corredores industriales (Ojeda y Arias, 2000). Adicionalmente, esta región aporta únicamente el 10,6% de la oferta hídrica nacional, con un rendimiento promedio de 27 l/s/km² y soporta aproximadamente el 70% de la población, donde se genera el 85% del PIB (Colmenares, 2007; IDEAM, 2010; Ojeda y Arias, 2000) y se presentan los mayores conflictos por el uso y asignación del agua (Domínguez *et al.*, 2008).

En esta región se encuentra la cuenca alta del río Cauca, la segunda fuente de agua más importante del país y principal arteria fluvial del Occidente Colombiano. En su paso por el Departamento del Valle del Cauca, el río Cauca tiene un área aproximada de 10.900 Km²; abarca 34 municipios donde se concentra el 90% del total de la población del departamento, con 35 subcuencas en un área total de drenaje de 11.443 Km². Posee un caudal promedio de 260 m³/s y corresponde a un 47% del territorio de la cuenca alta. En esta área, el deterioro de la calidad del recurso hídrico está relacionado con un inadecuado uso del suelo, y descargas de aguas residuales sin tratamiento, generadas por centros urbanos, zonas industriales y actividades agropecuarias. Así mismo, por inadecuadas prácticas en explotación minera y procesos de deforestación (CVC-UNIVALLE, 2007), de igual forma, presenta un índice de presión hídrica en el rango de *muy alto* (IDEAM, 2010).

De las 7.746 cuencas ubicadas en la cuenca alta del río Cauca, el 94,5% (7.321) corresponden a microcuencas con extensión menor a 10 km², en el país esta proporción corresponde al 96% (714.311). (IDEAM, 2001). Pese a la gran cantidad de microcuencas en el país y en la región andina, la normatividad colombiana prioriza la planeación de los recursos hídricos en las grandes cuencas, cuencas y subcuencas, como lo evidencian el Decreto 1729 de 2002, la guía técnico-científica para su operación (IDEAM, 2007), la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) (MAVDT, 2010c) y el Decreto 1640 de 2012 (MADS, 2013). Por lo anterior, se requieren estrategias ágiles, eficientes y fáciles de operar

para apoyar la toma de decisiones en la planeación de microcuencas andinas del país, en general y las ubicadas en el Departamento del Valle del Cauca, en particular.

1.2 TOMA DE DECISIONES EN LA PLANEACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

1.2.1 Toma de decisiones en la planeación de los recursos hídricos a nivel mundial

Alrededor del mundo, diversos esquemas y marcos conceptuales se han definido para la toma de decisiones en la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH). Algunas estrategias resumidas de América Latina se presentan de los países de Chile, Brasil, Costa Rica y México. De igual forma, se presentan algunas experiencias de la aplicación de la Directiva Marco del Agua (DMA), definida para apoyar las decisiones en los países miembros de la Unión Europea (UE), en los países de Alemania, Escocia y Suecia.

Chile concentra todas las tareas para la gestión del agua; medición, investigación y administración de las aguas terrestres a través de la Dirección General de Aguas. En Chile, la toma de decisiones para la gestión del agua se ha desarrollado a través de la definición del Código de Aguas de 1981, cuyo objetivo fue crear un país de “libre mercado” del agua sin la mediación del Estado, mediante la asignación de derechos del agua a actores privados, sin la obligación de hacer uso del caudal asignado (Jara-Rojas *et al.*, 2013). La distribución y asignación del recurso es responsabilidad de los particulares, siendo absolutamente libre su transacción, dando lugar al mercado de derechos del agua. La asignación original de los derechos se realiza a perpetuidad por los caudales solicitados, sin necesidad de justificación, en forma gratuita y sin que sea obligación de utilizar el agua al que se tiene derecho. En el balance de la aplicación de este Código, en 2012, el 99,9% de los hogares chilenos tenían acceso a agua potable, con un 96.3% de sistemas de alcantarillado y un 96.1% conectado a plantas de tratamiento de aguas residuales (Reyes-Mendy *et al.*, 2014), cifras bastante significativas en el contexto latinoamericano.

Sin embargo, este esquema de “libre mercado” del agua presenta algunas limitaciones: fomenta un mayor número de peticiones de los necesarios, concentra los derechos en grandes propietarios de tierra, genera escasez jurídica de recursos en zonas de captación, y genera barreras para empresas que requieren agua para funcionar (Reyes-Mendy *et al.*, 2014). De igual forma, presenta inconvenientes por la imposibilidad de reasignar caudales, dificulta el acceso al agua a pueblos aborígenes, pequeños propietarios de tierras agrícolas y conservación de la naturaleza, que son los afectados por la falta de derechos de agua suficientes para su propio desarrollo. Chile es un país con una alta diversidad de autoridades administrativas relacionadas con la gestión del recurso hídrico y esto dificulta la toma de decisiones efectiva para garantizar una coordinación eficaz de los recursos hídricos (Valdés-Pineda *et al.*, 2014).

En Brasil, los recursos hídricos son abundantes pero distribuidos de manera desigual y presentan dos grandes problemas: el primero asociado con el crecimiento poblacional en las grandes ciudades, sin la

infraestructura adecuada para el abastecimiento de agua, disposición sanitaria y protección contra inundaciones y deslizamientos, generando una fuerte contaminación. El segundo, asociado a los conflictos por la demanda de diversos sectores como: agricultura, energía, consumo doméstico e industrial y navegación fluvial (Indij *et al.*, 2011). La GIRH en Brasil ha estado a cargo de la Agencia Nacional de Aguas (ANA), creada en 2000, para coordinar y complementar los tres niveles administrativos, Federal, Estatal y Municipal. El modelo de gestión del agua en Brasil está inspirado en el modelo francés.

El sistema en Brasil está compuesto por Comités de Cuenca, Agencias de Cuenca y Cobro por el uso del agua, permitiendo la toma de decisiones en un marco técnico, sin presiones políticas. En este país, la sociedad civil y los usuarios tienen garantía de participación en la gestión del agua, a través de los Comités de Cuenca. El sistema es descentralizado y participativo y es un camino para la democratización, la estabilidad y respeto a las instituciones de cuenca. Este modelo también incluye la participación de asociaciones intermunicipales y de usuarios. Los comités funcionan adecuadamente cuando están asociados a un organismo de apoyo para desarrollar las intervenciones definidas en la toma de decisiones, en caso contrario, la eficacia de estos comités es muy limitado. Sin embargo, se requieren agencias eficaces para poner en práctica las decisiones del comité (Indij *et al.*, 2011). De igual forma, faltan datos científicos e información para la toma de decisiones en la gestión de pequeñas cuencas, generando dificultades para el suministro de agua, el riego de pequeñas zonas, la conservación del medio ambiente y las inundaciones.

Costa Rica ha sido pionero en establecer un sistema de pago por servicios ambientales, debido a sus fortalezas sociales, que incluyen altos niveles de educación, tradición de organización social y sistemas democráticos de gobierno. Este es uno de los pocos países que reconoce la importancia de sus bosques en la prestación de servicios ambientales, incluida la protección de cuencas hidrográficas y la recuperación de los recursos hídricos (Indij *et al.*, 2011). En este país, la toma de decisiones garantiza que grupos locales estén incluidos en beneficios de conservación para que participen en proteger zonas de captación de agua. Otra fortaleza es la actitud valiosa proactiva del Gobierno en la promoción del concepto de pago por servicios ambientales, y darles credibilidad a los actores interesados en la GIRH. Sin embargo, se tiene la necesidad de mejorar el proceso político, pues un fuerte sistema de precios no es suficiente para garantizar la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos. Un plan de uso de la tierra, y una política ambiental sólida también deben estar presentes (Indij *et al.*, 2011).

En México, la gestión del agua se realiza a través del Ejecutivo Federal, cuyas funciones son ejecutadas por la Comisión Nacional del Agua (CNA), luego están los Consejos de Cuenca (CC) que tienen la función de coordinarse con la CNA. Los CC son los organismos institucionales para la toma de decisiones en la GIRH. Los CC empezaron a utilizarse en México a finales de la década de los 90s, como un espacio donde usuarios y diferentes niveles de gobierno pudieran discutir sobre el uso y distribución del agua en su cuenca. Su función actual es coordinar la participación de los diversos actores y generar recomendaciones

para la gestión del agua. Otros organismos en México relacionados con la gestión de los recursos hídricos son: Asociación de Usuarios de los Distritos de Riego, Junta Central de Agua y Saneamiento, Juntas Municipales de Agua y Saneamiento, Juntas Reales de Agua y Saneamiento y Comité de Agua Potable. Pese a las diversas instituciones, en este país existen grandes conflictos por el uso del agua, debido al crecimiento poblacional y económico, generándose conflictos de diferente intensidad y escala, pues se presentan conflictos entre usuarios de la misma comunidad, entre distintas comunidades, municipios, estados y a escala transfronteriza (Indij *et al.*, 2011).

La Unión Europea (UE) en el año 2000 promulgó la Directiva Marco del Agua (DMA), como principal instrumento legislativo para la protección de los recursos hídricos para sus estados miembros (28 países). La DMA está soportada por los principios del enfoque de la planeación de cuencas hidrográficas y principios ecohidrológicos (Zalewski, 2010), donde los planes de gestión de CH deben asegurar que los recursos hídricos no se deterioran, identificando maneras de remover contaminación puntual y contaminación difusa (Zalewski, 2004). La DMA tiene como objetivo alcanzar buen estado ecológico en todos los cuerpos de agua para 2015 y no más allá de 2027, en todos los estados miembros de la UE (Wright y Frtsch, 2011).

La DMA tiene 5 etapas principales: caracterización de los cuerpos de agua, clasificación del estado ecológico, programas de monitoreo, programas de medidas y logros de los objetivos ambientales. En la etapa 1, se clasifican los cuerpos de agua en tres tipos: naturales, altamente modificados y artificiales y está focalizado para cuencas con tamaño $> 10 \text{ Km}^2$ y Lagos $> 50 \text{ Ha}$, incluye la identificación de presión e impactos. Los principales factores de presión son: fuentes puntuales, fuentes no puntuales, usos del agua, control de flujos y cambios morfológicos. En la etapa 2, se clasifica el estado ecológico de los recursos hídricos en elementos biológicos, donde se evalúa la composición, abundancia, biomasa y edad de la estructura de fitoplancton, fitobentos y macrófitos, invertebrados bentónicos y peces. Se realiza clasificación e intercalibración. Generando valores de alto, bueno, moderado, pobre y malo. En la etapa 3, el monitoreo está en la vigilancia, operación e investigación de los cuerpos de agua. Los datos se recolectan en sitios con niveles de malos, pobres y moderados del río. En la etapa 4, se definen un programa de medidas para la protección y eficiencia de la biodiversidad y un plan de gestión de la CH y en la etapa 5 se evalúa el logro de los objetivos ambientales, de tal forma que cumplan un buen estado ecológico y químico (REF).

En Alemania, la implementación de la DMA inició en el año 2002, donde nuevos instrumentos fueron introducidos en las leyes de la gestión del agua, sin embargo, la planeación del agua en el sistema de leyes alemanas no era completamente nueva, en la medida que se contaba con ciertos tipos de planes del agua. Sin embargo, la administración de los planes no era exitosa, en contraste a la implementación de planeación y toma de decisiones bajo la DMA, que parece ser promisoria (Albrecht, 2013). A finales del 2009, todas las cuencas hidrográficas de Alemania han establecido sus planes de gestión y se ha iniciado la

implementación de intervenciones (Albrecht, 2013). Para Alemania, la ventaja de la DMA consiste en que el contenido antes estaba centrado intermitentemente entre calidad y cantidad de agua y ahora a través de la DMA está focalizada principalmente en cantidad y calidad de agua y los periodos de planeación iban desde 10 a 20 años y ahora van a 6 años.

En Alemania, la participación antes de la DMA estaba concentrada en autoridades y ahora pueden participar todos los actores. Con la aplicación de la DMA, la planeación del agua ganó un nuevo momento, ya que los marcos para manejo del agua, planes de manejo y leyes para el control de la polución fueron sustituidas. Uno de los argumentos para la aplicación de la DMA fue la obligatoriedad de realizar los planes de gestión de las cuencas hidrográficas y la obligación de coordinación entre autoridades de la parte alta y baja de la cuenca así como con autoridades nacionales e internacionales, lo cual ha intensificado la coordinación entre autoridades. Otros aspectos relevantes son la estandarización de datos para la preparación de los planes con mecanismos sancionatorios y reportes obligatorios. Sin embargo, en Alemania, los diferentes Estados han empleado diferentes estrategias y procesos para implementar la DMA (Koontz y Newig, 2014).

En Escocia, que cuenta con cerca del 90% de los recursos hídricos del Reino Unido, la aplicación de la DMA se ha concentrado en la planeación de cuencas hidrográficas (PCH) considerando la capacidad de ecosistemas con respecto a nutrientes y contaminación tanto biológica como química, con énfasis en la reducción del impacto de la eutrofización, incrementando la reforestación y promoviendo zonas de protección (Allan, 2012). La PCH incluye trabajo con las comunidades de agricultores y horticultores para mejorar el manejo de los nutrientes, con el fin de reducir su flujo a cuerpos de agua. Para 2008, Escocia contaba con el 35% de las CH en condiciones de pobre, malo y moderadamente. Con la aplicación de la DMA, se espera que esta proporción disminuya en 2015 a 29%, en 2021 a 23% y en 2027 al 2%. Las fuentes de presión consideradas en este país fueron: contaminación, extracción y alteración de embalses y orillas. Para 2012, en Escocia, se han implementado las medidas identificadas en el primer ciclo de planeación y se espera que para 2014 se inicien los nuevos PCH (Allan, 2012).

La toma de decisiones en Suecia para la gestión del agua, antes de la implementación de la DMA, tenía una orientación horizontal en la medida que las municipalidades a nivel local tomaban las decisiones en relación con la planeación conjunta del agua y el uso del suelo, existía alguna colaboración vertical, con el nivel regional y nacional para la coordinación. A partir de la DMA, se desintegran los procesos entre los planeadores del uso del suelo y uso del agua y se deja la toma de decisiones a nivel supra-regional en vez de municipalidades. Ahora la colaboración vertical es más intensa, pero aumentan los conflictos por la planeación del agua y los recursos económicos en la medida que la toma de decisiones es supra-regional (Anderson *et al.*, 2012). En Suecia, la implementación de la DMA no ha dado lugar a ningún cambio apreciable en las prácticas de gestión del agua, pues no son claros los estándares de calidad del medio

ambiente, no es claro el proceso de planeación a nivel de CH que se quiere promover y los recursos a nivel municipal no han mejorado pero si a nivel superior (Anderson *et al.*, 2012). De igual forma, se excluye el uso del suelo en la PCH.

Para autores como Albrecht (2013) y Allan (2012), la Directiva Marco del Agua (DMA) es uno de los más ambiciosos instrumentos legislativos para la toma de decisiones en la planeación de la gestión de los recursos hídricos. Sin embargo, para Anderson *et al.* (2012), los planificadores ambientales esperaban que la DMA tuviera enfoques y metodologías más integrales que permitieran acercarse a resolver los problemas del agua. De igual forma, piensan que la DMA no presenta un manejo integrado del agua y el suelo y su énfasis está solo en el agua pero solo en aspectos de calidad y cantidad. Para Koontz y Newig (2014), la DMA no tiene una estrategia metodológica general ni un marco conceptual para su aplicación, y es percibida como demasiado general y las normas de calidad ambiental son poco claras.

La DMA ha tenido problemas de implementación en algunos países debido a la complejidad de cada cuenca hidrográfica, pues presentan diferencias en ecosistemas, economía y cultura, entre otros (Allan, 2012). De igual forma, el ritmo de aplicación de la DMA, es diferente en cada país. Los países con mayor limitación en adaptar este marco han sido España, Portugal e Italia. Debido a lo ambicioso de la DMA, es probable que las medidas para mejorar la calidad del agua necesiten ser tomadas a nivel local, lo cual causaría un problema pues los recursos se están manejando a nivel nacional. Así mismo, la DMA realiza una gran simplificación del modelo Fuerza-Presión-Estado-Respuesta-Impacto (FPERI), al solo considerar indicadores de Presión (Zhang *et al.*, 2014).

1.2.2 Toma de decisiones en la planeación de los recursos hídricos en Colombia

La toma de decisiones para la gestión de los recursos hídricos en Colombia ha estado relacionada con el marco legislativo y jurídico, el cual se ha ido desarrollando de acuerdo con la dinámica mundial y las vertientes de pensamiento de los diversos gobiernos. Es así como desde la época de la Colonia, Colombia ha promovido la protección de los recursos hídricos. En el Siglo XIX, el libertador Simón Bolívar expidió el Artículo 52, que promovía el cuidado de los bosques y ciénagas y enfatizaba la construcción de fábricas fuera de las ciudades y villas para no contaminar las aguas con materiales de desechos, animales o vegetales que en ellas se arrojaban (CINARA, 2000). En esa época la toma de decisiones y la política estuvo relacionada con la salud pública, más que la protección de los recursos naturales.

Durante el siglo XX, la toma de decisiones para la planeación de los recursos hídricos se inició en el Ministerio de Economía Nacional (MEN), que definió en 1928, la Ley 113, donde enfatizó el uso del agua para acueductos y generación de energía. En esta época, no hubo política para la preservación del recurso hídrico salvo la Ley 200 de 1936 que prohibió talar los bosques para preservar las vertientes de aguas (Arrojo *et al.*, 2007; Beaufort, 2007). En 1939, se definió la Ley 204, que creó el Fondo Nacional

Rotatorio de Irrigación y Desección para facilitar la inversión en acueductos, hidroeléctricas, conservación y reforestación forestal, con el fin de conservar el caudal del agua y la estabilidad de las obras (Beaufort, 2007), sin embargo, el énfasis de esta Ley fue obras de infraestructura y generación de energía hidroeléctrica y acueductos, y no de protección de los recursos hídricos.

En 1952, se creó la División de Recursos Naturales del Ministerio de Agricultura, destinado al manejo de la agricultura, silvicultura y pesca, para lograr la tecnificación y fomento de la economía del suelo. Pese a su misión: “desarrollo de los recursos naturales con miras a su conservación”, el énfasis se focalizó en la administración y extracción de los recursos naturales, sin criterios de conservación (Gómez, 2005). En 1953, se promulgó el Decreto 1371, también conocido como el Código de Saneamiento, que contenía las normas generales para controlar las aguas residuales, pero tuvo un bajo impacto real.

En 1954, se introduce el concepto de “Ordenamiento y Desarrollo Integral de Cuencas”, cuyo origen es el modelo norteamericano aplicado por la agencia Tennessee Valley Authority (TVA-EUA), creada para la generación de energía eléctrica y controlar las inundaciones del río Tennessee, en una región que abarca 7 estados de los EUA. Considerando esta experiencia, se definió el Decreto 3110, para crear la primera Corporación Autónoma Regional (CAR), en el Departamento del Valle del Cauca (CVC). La misión de la CVC fue ser una agencia de promoción del desarrollo regional y administración de los recursos naturales, con proyectos de generación y transmisión eléctrica, infraestructura vial, control de erosión, telecomunicaciones, control de inundaciones, saneamiento básico, construcción de acueductos, descontaminación de aguas y desarrollo agropecuario, entre otros (Gómez, 2005). La CVC se focalizó en la gestión de los recursos hídricos en la cuenca alta del río Cauca, pero con énfasis en producción energética y abastecimiento de agua, no hubo en este periodo política ni estudios integrales para la preservación del recurso hídrico a través de la planeación de cuencas hidrográficas.

La CVC fue el modelo para la creación de otras dieciocho CARs Departamentales entre 1960 y 1988, pero debido a la gran diversidad de funciones se diluyó la toma de decisiones para la gestión de los recursos hídricos. La definición de las CARs no correspondió a conceptos como ecosistemas, unidades biogeográficas o cuencas hidrográficas sino que obedeció a divisiones político-administrativas: Departamentos. Estas Corporaciones estuvieron adscritas a diferentes entes administrativos: Ministerio de Desarrollo Económico (1960–1968), Ministerio de Agricultura (1968–1976) y Departamento Nacional de Planeación (1977 a 1993). Lo anterior, generó inestabilidad institucional en estas CARs.

En el periodo 1966 a 1970 se crea el Instituto Nacional de Desarrollo de los Recursos Naturales, INDERENA, adscrito al Ministerio de Agricultura (MA), con funciones de ordenación y desarrollo integral de cuencas hidrográficas, entre otras. Sin embargo, la escasa coordinación entre el INDERENA y las CARs, la poca conciencia sobre la problemática ambiental del momento y una visión policial de control y vigilancia

de los recursos naturales, impidieron al instituto cumplir su función (Beaufort, 2007). De igual forma, no se contó con un marco o una metodología que guiará la toma de decisiones y la PCH en el país.

En 1974, como respuesta a la Conferencia de Estocolmo y su declaración en 1972, Colombia adquiere un nuevo marco jurídico en materia ambiental con la expedición del Código de Recursos Naturales Renovables y del Medio Ambiente, Decreto Ley 2811, que constituye el derrotero de referencia normativo en cuanto al uso y manejo de aguas, suelo, flora y fauna y es considerado el primer código en América Latina. Pese a la creación de este código, el país no tenía un norte claro a nivel de gestión ambiental ni una base institucional estructurada y coherente que se encargara de regular y dinamizar la legislación ambiental existente y las funciones ambientales se distribuían en diferentes dependencias estatales.

Entre 1974 y 1991, se promulgaron diversas normas relacionadas con la toma de decisiones del recurso hídrico (IDEAM, 2004): el Decreto 2857 de 1981, que define las finalidades de la ordenación de cuencas y los objetivos y alcances de sus planes de manejo; la Ley 56 de 1981, que permite la generación y destinación de recursos financieros para la protección y manejo de cuencas. El Decreto 2857 de 1981, reglamentario de cuencas hidrográficas, que da instrumentos legales para la adopción de nuevas estrategias y enfoques en este campo. Así mismo, el Decreto 103 de 1982 crea la “Comisión Permanente para la Cuenca del Río Magdalena”, para la coordinación interinstitucional de acciones en la cuenca y la prospección de la elaboración del “Plan Maestro de Manejo” (Gómez, 2005). En 1983, se define el Acuerdo 0041 por el cual se determinan los procedimientos y competencias para la ordenación y manejo de cuencas hidrográficas por parte del INDERENA. En 1987, se limitan las funciones de las CARs y se transfieren a otras entidades las funciones de infraestructura, telecomunicaciones, servicios públicos y saneamiento ambiental. En este periodo, el énfasis de la gestión de cuencas estuvo establecido por el desarrollo agropecuario e hidroenergético en el país (IDEAM, 2004), eran acciones multipropósito, muy dispersas y con poca participación comunitaria.

Entre 1990 y 1992, el INDERENA llevó a cabo el Inventario y Caracterización de Cuencas, en las vertientes del Caribe, Pacífico, Orinoquia y Amazonia Colombiana. Así mismo, gestionó el manejo de microcuencas, para dar respuesta a la necesidad de incorporar el tema del abastecimiento en cantidad, calidad y regularidad de agua a poblaciones pequeñas y a la necesidad de cambiar estrategias en el manejo de los recursos naturales, acercando y comprometiendo a las comunidades en la gestión del agua, para asegurar la apropiación de los pobladores de una región a sus recursos naturales y en especial al agua (IDEAM, 2004). Sin embargo, estos procesos no tuvieron continuidad y no se lograron avances significativos. De igual forma, no hubo coordinación con las CARs y no se generaron instrumentos de política o herramientas para la gestión de cuencas hidrográficas en el país.

En 1991, se promulgó la nueva Constitución Política Nacional (CPN, 1991), la cual significó un avance conceptual y potenciador ambiental, en tres aspectos: descentralización, participación ciudadana y

función social y ecológica de la propiedad. Así mismo, plantea la necesidad de promover el ordenamiento del territorio, el uso equitativo y racional del suelo y la preservación y defensa del patrimonio ecológico y cultural del país (IDEAM, 2008). La CPN de 1991 contiene 49 artículos para la protección ambiental y recursos naturales y es considerada por expertos como la “Constitución ambiental” (Ojeda y Arias, 2000). De igual forma, es destacada por su integralidad y coherencia, en comparación con las existentes en otros países de la región.

En contexto con la conferencia de Río de Janeiro (1992) y a partir de la nueva CPN, se expide la Ley 99 de 1993 que estableció un nuevo marco institucional ambiental, se crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA), como un conjunto de orientaciones, normas, actividades, recursos, programas e instituciones que permitan el cumplimiento de los principios generales consagrados en la Ley 99 (IDEAM, 2008). Se creó el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), como ente rector nacional del SINA, encargado de formular políticas nacionales y ser interlocutor frente al resto del Estado. En este sentido, Colombia fue uno de los primeros países en América Latina en establecer un ministerio ambiental (Mance, 2007), con la posibilidad de convertirse en un estado ambientalista. A partir de este momento, se redefinen las funciones de las CARs, convirtiéndose en entidades públicas, autónomas, administradoras y tomadoras de decisiones del medio ambiente y de los recursos naturales renovables en su respectiva jurisdicción (López, 2000).

El SINA lo pasan a integrar 35 CARs, cinco institutos de investigación, encargados de dar soporte técnico y científico, cinco autoridades ambientales urbanas en las principales ciudades y una Unidad de Parques Nacionales Naturales. Uno de los institutos creados fue el IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, instituto de carácter nacional adscrito al MMA, con autonomía administrativa y personería jurídica, con funciones de obtener, analizar, estudiar, procesar y divulgar información básica sobre hidrología, hidrogeología, meteorología, geografía en aspectos biofísicos, geomorfológicos, suelos y cobertura vegetal (IDEAM, 2004).

Sin embargo, pese a esta gran consolidación institucional a nivel nacional para la toma de decisiones ambientales en general y en particular de los recursos hídricos, no se crearon mecanismos de articulación entre las diversas organizaciones del SINA, especialmente las relaciones con las CARs, faltaron mecanismos de coordinación para la toma de decisiones y la aplicación de políticas públicas sectoriales, que se reflejó en una desarticulación entre los ámbitos regional y nacional (ICP, 2008). Según la CGR (2011), estas organizaciones se mueven en un marco institucional débil y las autoridades ambientales no realizan un adecuado seguimiento, control y sanción para la protección de los recursos hídricos (CGR, 2011). De igual forma, se presenta ausencia de comunicación entre los institutos de investigación y el MMA, los institutos presentan agenda de investigación propia generando competencia con centros de investigación, universidades, ONG's y las CARs, con lo cual se apartan de su vocación de brindar información a las autoridades ambientales (ICP, 2008).

En la década de los 90s, la toma de decisiones ambientales y de gestión de los recursos hídricos estuvo dedicada a la organización y consolidación del SINA. En este periodo se formularon otras políticas relacionadas con el recurso hídrico, entre las que se destacan: Política de Biodiversidad en Colombia (1995); Política para el Manejo Integral del Agua, Política de Bosques (1996); Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) (1997); Política de Producción más Limpia (PML) (1997); Lineamientos de Política para la Participación Ciudadana en la Gestión Ambiental (1998) y Lineamientos para la Política Nacional de Ordenamiento Ambiental del Territorio (1998), entre otros. Adicionalmente, se cuenta con los planes de desarrollo municipal, departamental y nacional. Estos instrumentos de planeación dan un marco único en el país para promover una gestión integrada de los recursos naturales en general y en particular para la gestión de los recursos hídricos.

Pese al gran esfuerzo, el SINA presenta un diseño institucional inadecuado para la gestión ambiental regional y de los recursos hídricos debido a la creación de nuevas autoridades ambientales urbanas, cuyo mandato se superpone con las CARs y la ausencia de regulación sobre la forma como la sociedad civil y las minorías étnicas pueden participar en las distintas instancias del SINA (ICP, 2008).

En el 2002, por un cambio de gobierno, se fusionan el MMA y el Ministerio de Desarrollo Económico y Social generando el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). Este cambio originó una pérdida de relevancia institucional del componente ambiental, al pasar de un Ministerio a un Viceministerio (Pérez *et al.*, 2010) y fue un factor determinante del declive institucional, ambiental y se volvió vulnerable a las decisiones y cambios políticos (Mance, 2007). En 2005, de 27 técnicos se disminuyó a 6 y de 10 asesores ambientales se redujo a 2 y las CARs, no sucumbieron pero fueron afectadas por intereses politiqueros que perjudicaron la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico (Mance, 2007). El país ingresó al desarrollo minero, con prioridad en el desarrollo económico y se produjo un “ablandamiento” de las normas y medidas, que debilitaron la sostenibilidad ambiental y la preservación de los recursos hídricos (Guhl, 2010).

En el año 2002, se expide el Decreto 1729 que establece las finalidades, principios y directrices para el proceso de Planeación Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA). Los POMCAs deben establecer los programas, proyectos, responsables y presupuestos para la conservación, restauración y uso sostenible de las cuencas hidrográficas. A través de este decreto, el IDEAM, propuso y ajustó la Guía Técnico Científica (GTC) para la elaboración de los POMCAs. La GTC contiene seis etapas para desarrollarlos: aprestamiento, diagnóstico, prospectiva, formulación, ejecución, seguimiento y evaluación (IDEAM, 2004; IDEAM, 2008; IDEAM, 2010; MADS, 2013). Sin embargo, Ministerios con gran uso e impacto en el recurso hídrico no participaron en la elaboración de esta GTC, entre los que se encuentran: Ministerio de Agricultura, Ministerio de Minas y Energía y Ministerio de la Protección Social, entre otros.

La GTC definió como principios orientadores para la PCH en Colombia los siguientes ejes: construcción local con visión regional y nacional; participación, concertación, planeación, ejecución, seguimiento y ajuste con todos los actores; enfoque sistémico y gestión integral; construcción articulada, compartida y transparente de la información y el conocimiento; equidad social; respeto al patrimonio cultural y natural; convivencia y competitividad sostenible; articulación con planes de ordenamiento territorial, planes de vida, planes de desarrollo etnocultural, planes de desarrollo y expansión sectorial. Sin embargo, es necesario complementar estos ejes de tal forma que se incluyan aspectos relevantes en la PCH, como son desarrollo sustentable del agua, gestión de conocimiento, cambio climático, monitoreo eco-ambiental, entre otros. De igual forma, se deben identificar las principales intervenciones en estos ejes con el fin de acercarse a la condición de sostenibilidad socio-ambiental en las cuencas hidrográficas del país.

El Decreto 1729, le da énfasis a cuencas entre 300 Km² y 3000 Km², correspondiente a 1.243 (0.16%) cuencas de 742.725 identificadas en el país (IDEAM, 2004), lo cual es crítico pues más del 80% de las cabeceras municipales se abastece de microcuencas, con bajas condiciones de regulación y alta vulnerabilidad (MAVDT, 2010c) y las microcuencas corresponden al 99% de las CH en el país (IDEAM, 2004). Similarmente, a 2009, de las 1.243 cuencas definidas para planeación, se habían iniciado el proceso de 256 (20%), de los cuales se habían adoptado tan solo 77 (6%) POMCAs, y de estos no existe información ni conocimiento sobre los procesos de implementación y seguimiento de las intervenciones definidas en estos planes (MAVDT, 2010c).

En el año 2010, se define la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) que establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y una línea de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico y establece directrices unificadas para el manejo de agua (MAVDT, 2010c). Esta política se generó para dar cumplimiento al Plan de Desarrollo Nacional (2006-2010) que pretendió resolver la problemática del recurso hídrico, hacer uso eficiente del agua y preservarla como una riqueza natural para el bienestar de las generaciones futuras de los colombianos (MAVDT, 2010c). Contrario al Decreto 1729 de 2002, en la PNGIRH se incluye explícitamente el concepto de GIRH, pero se definió 8 años después del inicio del proceso de planeación de cuencas hidrográficas en el país, lo cual se ve reflejado en los POMCAs realizados a la fecha. El énfasis de la PNGIRH tiene una proyección a componentes tradicionales como oferta, demanda, calidad y riesgos del recurso hídrico (MAVDT, 2010a).

En el año 2012, se divide nuevamente el MAVDT y se crea el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y se separan las funciones de vivienda y desarrollo territorial. El nuevo MADS expide el decreto 1640 de 2012, donde se reglamenta la política de planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos, para armonizar la normatividad con el esquema planteado en la PNGIRH del 2010 (CGR, 2012). Esta norma derogó los decretos 1604 y 1729 de 2002 sobre ordenamiento de CH en el país. Según la CGR (2012), este nuevo decreto surge ante las debilidades en la definición de cuencas susceptibles

de ordenación, las escalas de ordenación y las dificultades de implementación de los POMCAs, por parte de las CARs. El PND 2010-2014 establece como meta la formulación de 5 planes estratégicos a nivel de Macrocuencas: Magdalena-Cauca, Caribe, Pacífico, Orinoco y Amazonas, los cuales fueron reglamentados en el nuevo Decreto 1640 de 2012. Sin embargo, a la fecha no existe ningún Plan Estratégico de la Macrocuena Magdalena-Cauca, priorizado por el MADS y, teniendo en cuenta estos resultados, existen serias dudas para los otros planes de Macrocuencas (CGR, 2012).

De acuerdo a CGR (2012), el nuevo Decreto 1640 de 2012 no se ha empezado a aplicar, porque no se cuenta con mapas de zonificación hidrográfica a escala 1:500.000 y no existe la guía técnica para la formulación de los POMCAs, por lo cual no se tienen resultados del cumplimiento de esta meta del PND. Para CGR (2012), es necesario contar con herramientas técnicas y metodológicas del cómo hacer viable la construcción e implementación efectiva de los POMCAs dadas las dificultades que en el pasado ha representado para las CAR's el proceso de ordenación de cuencas hidrográficas. De igual forma, el MADS no ha presentado la propuesta del Plan Hídrico Nacional que se constituye en el plan de acción para la implementación de la PNGIRH, que permita establecer los objetivos, metas, actividades y presupuesto de los 10 programas prioritarios de la mencionada política pública, por lo cual no se han definido las metas de corto plazo, previstas para el periodo 2010-2014, menos aún las metas de mediano plazo (2018) y largo plazo (2022) (CGR, 2012).

En 2014, el IDEAM ha generado una convocatoria con el siguiente objetivo: “Elaborar, desarrollar y ajustar los insumos técnicos que requiere el MADS, para expedir la Guía Metodológica para la Formulación de los Planes de Manejo Ambiental de Microcuencas Hidrográficas, en virtud de lo señalado en el Decreto 1640 de 2012 y definir elementos conceptuales y metodológicos para la priorización de microcuencas con fines de ordenación y manejo para reducir la vulnerabilidad de los acueductos de las cabeceras municipales” (IDEAM, 2014). Esta convocatoria es importante pues permite evidenciar la necesidad de generar elementos conceptuales y metodológicos para la planeación de microcuencas en el país, dada su importancia estratégica para el suministro de agua para diversos usos. Los resultados de esta investigación darán aportes conceptuales e instrumentos para la elaboración y aplicación de esta guía.

De acuerdo con la revisión anterior, Colombia, desde la época de la Colonia ha realizado grandes esfuerzos en normatividad, políticas y recursos financieros para la gestión de los recursos hídricos, sin embargo, esto no se ha visto reflejado en la situación socio-ambiental de las cuencas hidrográficas en el país. Todo lo contrario, la situación de la gran mayoría de ríos en Colombia presentan unos niveles de contaminación suficientemente elevados como lo muestra el Estudio Nacional del Agua (ENA, 2010), donde reporta que la carga total de DBO generada por los sectores doméstico, industrial y cafetero, se estimó para 2008 en 819.235 toneladas al año, de los cuales solo se removi6 el 11%, a través de tratamiento de aguas residuales. El mismo estudio reporta que cerca de 483 municipios, con una población cercana a doce

millones de habitantes, presentan un índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico dentro de las categorías de medio, alto y muy alto, para un año medio.

En el país existe una débil institucionalidad en la medida que es sujeta a políticas de gobierno más que a políticas de Estado. Los constantes cambios en la política, sin una evaluación de las ventajas y limitaciones de los procesos anteriores, no permiten un avance significativo en la PCH. Colombia es considerado uno de los países de la región con mayor normatividad e institucionalidad alrededor de los recursos hídricos, sin embargo, varios autores reconocen las debilidades en este sentido. Por ejemplo, Quinaxi (2007) argumenta que el país ha carecido de una visión integral del recurso y de su ciclo, por lo que la gestión y toma de decisiones se ha dado de forma sectorial y segmentada, partiendo del supuesto equivocado de que la totalidad del agua está disponible para cada uno de los usos. De igual forma, no existe buena coordinación entre las diversas instituciones encargadas de la planeación de los recursos hídricos. Lo anterior, genera procesos deficientes, sectoriales, de corto plazo, desarticulados y fragmentados que afectan negativamente la sostenibilidad del recurso hídrico.

En términos generales, la politización de las CARs ha generado un fuerte debilitamiento en la toma de decisiones ambientales, pues se prioriza lo económico sobre lo socio-ambiental. Los órganos de control han perdido gobernabilidad sobre el recurso hídrico pues no ejercen efectivamente las funciones de control sobre los diversos sectores productivos tales como agricultura, minería, turismo, ganadería e industria. Tal como se evidencia en el caso del río Zaragoza en el Valle del Cauca, donde la minería informal alteró irremediablemente la calidad y la forma de la cuenca, sin que la autoridad ambiental o los municipios pudieran tomar las acciones correctivas oportunamente. De igual forma, es un ejemplo de los problemas de toma de decisiones el caso de los conflictos por el uso del agua en el municipio de Villa Rica en el Departamento del Valle del Cauca, donde el escaso recurso hídrico se prioriza para el sector cañero por encima del sector doméstico, generando fuertes conflictos entre las comunidades y los ingenios azucareros (Pérez y Rojas, 2008).

Adicionalmente, las CARs, no cuentan con personal técnico suficiente para el desarrollo de los POMCAs, por lo cual se crean en el país un sin número de ONGs, para la realización de estos planes. Estas ONGs realizan las etapas de aprestamiento, diagnóstico, prospectiva y formulación, cada una con sus propios procesos, énfasis y metodologías. Estos POMCAs presentan profundidad en el proceso de diagnóstico, con amplia información socio-económica e información georeferenciada en algunos aspectos bio-físicos. Sin embargo, los problemas se enfatizan generalmente en aspectos de calidad y cantidad de agua. De igual forma, en términos generales las intervenciones propuestas no diferencian la zona alta, media y baja de la cuenca, como tampoco diferencian el tiempo de ejecución en corto, mediano y largo plazo.

Las intervenciones propuestas no corresponden a un modelo conceptual previamente definido, que integre aspectos como desarrollo sustentable del agua, cultura del agua, educación ambiental, cambio

climático y gestión de conocimiento, entre otros. Adicionalmente, el uso de herramientas analíticas está ausente para la toma de decisiones en estos planes, no se utilizan modelos de simulación, sistemas soporte a la decisión u otras herramientas analíticas que guíen de manera académica, objetiva, lógica y transparente la toma de decisiones. Sin embargo, es de resaltar el uso de modelos de simulación para la toma de decisiones en aspectos de calidad y cantidad de agua en grandes cuencas hidrográficas en el país, como es el caso de la modelación del río Cauca, del río Bogotá y del río Medellín, entre otros, pero estos resultados no forman parte directa de los POMCAs.

1.3 DESAFÍOS DE CONOCIMIENTO

La planeación de los recursos hídricos es un tema permanente en la agenda mundial dada la importancia del agua para las diversas actividades humanas, los ecosistemas y la biodiversidad, y el grave deterioro que viene afrontando debido al crecimiento poblacional, el desarrollo económico e impactos por el cambio climático, entre otros. Tanto a nivel mundial como a nivel nacional se han desarrollado grandes esfuerzos para generar normatividad y algunos marcos conceptuales para la toma de decisiones en la planeación de los recursos hídricos a través de la planeación de cuencas hidrográficas (PCH), sin embargo, aún no se cuenta con un modelo conceptual lo suficientemente general que permita evidenciar la complejidad de la toma de decisiones en la gestión de cuencas hidrográficas, que contenga ejes transversales como desarrollo sustentable del agua, cultura del agua, educación ambiental, cambio climático y gestión de conocimiento, entre otros. Adicionalmente, que contribuya a la toma de decisiones en la definición de intervenciones en la búsqueda de una cuenca hidrográfica sostenible.

En el país, pese a los grandes esfuerzos, el proceso de PCH no se ha podido consolidar, mientras el deterioro de los recursos hídricos va en un aumento acelerado. La gestión de conocimiento está ausente en estos procesos y la participación de los diversos actores es absolutamente débil. Por lo cual, se requiere pensar y desarrollar herramientas novedosas que permitan agilizar la definición de intervenciones a través de la tipificación de los principales problemas en una CH en el país. De igual forma, el desarrollo de un modelo conceptual y un modelo operativo basado en conocimiento contribuiría a la toma de decisiones para las instituciones y diversos actores ubicados en una CH. Se requiere conceptualizar el sistema cuenca hidrográfica como un sistema complejo compuesto de múltiples subsistemas asociados, que permita definir un modelo conceptual holístico con múltiples ejes para abordar los aspectos fundamentales en el proceso de toma de decisiones para la gestión de los recursos hídricos a través de la PCH.

En Colombia, como en otros países, la planeación de microcuencas no ha sido prioridad, lo que ha conllevado a una escasa elaboración e implementación de planes de manejo de microcuencas en el país, en la región andina y en la región andina en el Departamento del Valle del Cauca. Situación preocupante, considerando que un alto porcentaje de acueductos del país se surten de ríos pequeños, quebradas y arroyos,

localizadas en microcuencas, lo que determina una alta vulnerabilidad de estos aprovechamientos. Los posibles efectos de una reducción de la oferta y contaminación hídrica se manifestarían de forma casi inmediata en los sistemas de suministro de agua potable de gran parte de la población colombiana y la limitación del recurso para sus diversos usos incluyendo los ecosistemas. Esto sugiere que se requiere hacer una planeación a nivel de microcuencas, como un aporte a la planeación de los recursos hídricos en la región andina colombiana, de tal forma que se definan, en esta escala, estrategias de intervención para la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH).

Como un aporte e innovación para el apoyo a la planeación de microcuencas andinas se requiere generar una herramienta conceptual y metodológica que guíe la toma de decisiones a nivel de gestión y política en la definición de intervenciones en el marco de una microcuenca andina sostenible. Esta herramienta debe ser fácil de usar por diversos actores, útil, ágil, estar disponible y basarse en procesos de gestión de conocimiento.

Por lo anterior, la pregunta de investigación de este doctorado es:

¿A través de gestión de conocimiento se pueden generar un modelo conceptual para la planeación de cuencas hidrográficas, que integre ejes fundamentales, y un sistema soporte a las decisiones operando en Web con el uso de la inteligencia artificial para el apoyo a la toma de decisiones en la planeación de microcuencas andinas?

1.3 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Conceptualizar y desarrollar un Modelo Conceptual Basado en Conocimiento (MBC) operado con herramientas de la inteligencia artificial para apoyar el proceso de toma de decisiones en la planeación de cuencas hidrográficas, con énfasis en microcuencas andinas.

1.4.2 Objetivos específicos

- i) Caracterizar los principales problemas de las cuencas hidrográficas en Colombia a través del proceso de gestión de conocimiento.
- ii) Definir un modelo conceptual para el apoyo a la toma de decisiones en la planeación de cuencas hidrográficas.
- iii) Construir un modelo operativo basado en conocimiento para la planeación de microcuencas andinas, usando tecnología de la inteligencia artificial.
- iv) Construir un prototipo computacional operando en Web con software de dominio público para operar el modelo operativo basado en conocimiento.

- v) Aplicar el prototipo computacional en una microcuenca andina de la cuenca alta del río Cauca en el Departamento del Valle del Cauca en Colombia.

1.5 COMPONENTES METODOLÓGICOS GENERALES

Esta investigación se desarrolló utilizando diversos conceptos, metodologías y herramientas computacionales. A nivel de modelos conceptuales se utilizaron de forma integrada los siguientes: Teoría General de Sistemas (TGS), Desarrollo Sustentable (DS), Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH), Modelos de Planeación (MP), Modelos Basados en Conocimiento (MBC), Sistemas Soporte a la Decisión (SSD) e Inteligencia Artificial (IA). Un esquema genérico de los conceptos y metodologías utilizadas se presenta en la Figura 1.1. De igual modo, varias herramientas metodológicas fueron utilizadas en el desarrollo de esta investigación: modelos estadísticos, modelos basados en conocimiento, indicadores e índices de presión, estado, respuesta y lógica difusa. A nivel de modelos estadísticos se utilizó estadística descriptiva y estadística inferencial, a través de: distribución de frecuencias, tamaño de muestra, diagramas de cajas y alambres, intervalos de confianza y análisis multivariado de componentes principales.



Figura 1.1 Conceptos y metodologías utilizadas en la construcción del modelo conceptual

Se utilizaron procesos de gestión de conocimiento para la tipificación y jerarquización de los principales problemas en las cuencas hidrográficas en Colombia; así como para la construcción de un modelo conceptual para la planeación de una CH. Para la construcción del modelo operativo se construyeron seis índices cualitativos a través de indicadores de presión, estado y respuesta (PER), en combinación con la técnica de la inteligencia artificial denominada lógica difusa. Para operar el modelo operativo se construyó un prototipo de sistema soporte a las decisiones (SSD) basado en conocimiento, utilizando software de dominio público operando en Web. La metodología de desarrollo del SSD fue la Programación Extrema

(XP: Extreme Programming), clasificada dentro de las metodologías ágiles de programación y se desarrolló utilizando una combinación de lenguajes de programación de código abierto: *Prostgre SQL*, *Java*, *Ajax-jQuery* y *jFuzzyLogic*. El prototipo SSD-BC-Web se denominó *cuencandina* y se aplicó a la microcuenca andina El Chocho, que se encuentra ubicada en la cordillera occidental de los Andes, en la zona rural del municipio de Cali del departamento del Valle del Cauca en Colombia.

1.6 ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1 Alcances

En esta investigación se propone un modelo conceptual como un marco general para la planeación de cuencas hidrográficas, que contiene ejes fundamentales para ser considerados en este proceso, de igual forma se conceptualiza el proceso de planeación como un sistema integrado por varios subsistemas. Estos modelos conceptuales pueden ser utilizados de forma genérica, en cualquier región del mundo y en cualquier proceso de planeación de una CH, independientemente de la escala de la cuenca: microcuenca, subcuenca, cuenca o gran cuenca. El sistema soporte a las decisiones (SSD) denominado *cuencandina* tiene como marco de acción la planeación de microcuencas andinas, a través de la aplicación de seis índices cualitativos, en este sentido su marco de acción son las microcuencas andinas del país.

1.6.2 Limitaciones

En el desarrollo de esta investigación se presentaron algunas limitaciones, entre las que se destacan: los procesos de planeación de las cuencas hidrográficas, a nivel del país, generalmente están referenciadas por organismos estatales y poco se encuentra en literatura académica. Esto posiblemente por la dificultad de acceder a recursos y desarrollar investigación a esta escala. De igual forma, en el país las problemáticas de las cuencas hidrográficas no se encuentran clasificada ni estructurada.

Se presentó una fuerte limitación entre los diversos actores de las cuencas hidrográficas y los funcionarios de los organismos estatales para diferenciar los conceptos de datos, información y conocimiento. De igual forma, la aplicación de encuestas estructuradas con preguntas abiertas es una gran limitación para la mayoría de actores y líderes comunitarios, ubicados en microcuencas andinas.

Tanto los modelos conceptuales como operativos definidos en esta investigación requieren de un proceso mucho más amplio de evaluación por parte de diversos actores presentes en una CH y evaluación de diversos escenarios de operación socio-ambiental.

2. GESTIÓN DE CONOCIMIENTO PARA CARACTERIZAR LOS PROBLEMAS DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN COLOMBIA

1.4 2.1 INTRODUCCIÓN

La gestión del conocimiento es el proceso por el cual se identifica, organiza, sistematiza y trasfiere conocimiento para el apoyo a la toma de decisiones. En este capítulo, utilizando el enfoque sistémico, el sistema cuenca hidrográfica es definido considerando 13 subsistemas y a través de la gestión de conocimiento se presenta una tipificación y jerarquización de los principales problemas de una cuenca hidrográfica en Colombia, clasificados en los 13 subsistemas definidos. Se aplicó una encuesta estructurada con el fin de identificar y ponderar los problemas en cada subsistema. Se utilizaron técnicas de la estadística descriptiva e inferencial para describir la ponderación de cada subsistema y se aplicó la técnica multivariada de análisis de componentes principales para evaluar la dimensionalidad de los 13 subsistemas, lo cual permitió reducirlos a 4 subsistemas principales. Así mismo, se genera una base de conocimiento con los principales problemas ponderados de las cuencas hidrográficas en Colombia, clasificados en 13 subsistemas.

1.1. REVISIÓN DE LITERATURA

2.2.1 Sistema cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica ha sido considerada como un sistema por diversos autores, generando una diversidad de subsistemas asociados a este importante sistema. La clasificación básica es considerar dos subsistemas; el sistema natural y el sistema social. Sin embargo, diversos autores definen otros subsistemas, es así como PNUMA (2001) define cuatro subsistemas: biológico, físico, económico y social, mientras Salomón (2008), considera tres subsistemas: ambiental-hídrico, socio-económico e institucional (Salomón *et al.*, 2008). Para Ovalles *et al.* (2008) se tienen tres subsistemas: socio-económico y cultural; físico-natural y el político-institucional y administrativo (Ovalles *et al.*, 2008). Para CATIE (2006), el sistema CH está compuesto por ocho subsistemas: social, económico, político, institucional, cultural, legal, tecnológico, productivo, físico y biológico, mientras CINARA (2011), aborda la CH a partir de seis subsistemas: natural, humano, edafológico, geomorfológico, climatológico y agua (CINARA, 2011) y el MADS (2013) define los subsistemas: físico-biótico, socio-económico y cultural, político-administrativo y gestión del riesgo.

Sin embargo, es necesario considerar otros subsistemas que permitan caracterizar los diversos problemas en ellos y que no han sido considerados anteriormente, tales como: subsistema de conocimiento e información y subdividir el subsistema bio-físico en agua, aire, suelo y ecosistemas y biodiversidad.

2.2.4 Problemas en las cuencas hidrográficas de Colombia

Los problemas en las cuencas hidrográficas se generan por disfunciones, desequilibrios y conflictos que son originados por incompatibilidades entre el medio natural y las diversas actividades sociales desarrolladas, por lo cual es importante compilar conocimiento para identificar los problemas asociados a los recursos hídricos y proponer intervenciones para resolverlos (Kaewboonma *et al.*, 2013a). Diversos actores han tipificado problemas asociados al sistema CH, es así como Parra (2009) identifica los siguientes:

contaminación de aguas, concentración urbana, incremento de residuos industriales y urbanos, pérdida de biodiversidad a nivel de especies y ecosistemas, crecimiento económico y disminución de calidad y cantidad de recursos naturales, tales como: suelos, bosque nativo y aguas dulces y marinas (Parra, 2009). Mientras, para Jiménez (2008) son: deforestación, colonización, contaminación, quemas, sobrepastoreo, agricultura degradante, apertura de vías, represas y embalses, minería inadecuada, infraestructura y viviendas en zonas vulnerables (Jiménez, 2008).

De igual forma Salomón (2008) encontró los problemas de una cuenca hidrográfica en tres categorías: problemas socioeconómicos: bajo nivel de educación, bajos ingresos, escasa asistencia técnica, limitada tecnología de riego y baja productividad, entre los problemas ambientales-hídricos: poca disponibilidad del recurso, escasez de precipitaciones, deterioro de calidad de agua, disminución de cobertura vegetal, malas prácticas agrícolas y sobrepastoreo, quemas y manejo inadecuado de desechos y entre los problemas institucionales: deficiente gestión del conocimiento, falta de políticas para el manejo de recursos hídricos, débil coordinación interinstitucional e intersectorial, escasa participación y toma de decisiones y competencia institucional.

En Colombia se han identificado diversos problemas ambientales a nivel departamental, a través de las contralorías departamentales (CGR, 2008), considerando el porcentaje de aparición, así: vertimiento de aguas residuales sin tratamiento (70%), contaminación de fuentes de agua (70%), agua no apta para consumo humano y deficiencia en acueductos (55%), deforestación (55%), manejo inadecuado de residuos sólidos (45%), plantas de sacrificio inadecuadas (25%), degradación y mal manejo de suelos (25%), conflictos de oferta y demanda de agua (25%) y caza excesiva y pérdida de fauna (20%). La CGR (2008) identificó problemas específicos asociados a la calidad de agua, tales como: deforestación, contaminación de fuentes por vertimientos de residuos líquidos y sólidos (aguas residuales domésticas, industriales, lixiviados y residuos sólidos), falta de información, fenómenos de urbanización sobre zonas de ronda en fuentes hídricas, desecación de humedales, poca cultura ciudadana frente a la protección del recurso hídrico y uso ineficiente del agua potable, evidenciado por altos niveles de pérdidas de agua (acueductos, riego o industria).

En diversos POMCAs se han definido los principales problemas en las CH en el país, destacándose: quemas, mal manejo y deposición de residuos, inundaciones, explotación de material de arrastre, presencia de parcelaciones, cultivos de caña, tala, contaminación del agua, desaparición de humedales, alta demanda de agua, problemas de seguridad alimentaria, deslizamientos, erosión, presencia de grupos armados al margen de la Ley, lugares con agua sin tratamiento, contaminación atmosférica, deterioro del suelo, intervención en áreas forestales protectoras, escasez de agua, contaminación del agua, pérdida de bosques y zonas de protección de ríos, pérdida de flora y fauna, pérdida de la cobertura vegetal en zonas de nacimiento de ríos, manejo y disposición inadecuada de aguas residuales, industriales y domésticas, asentamientos poblacionales sin planificación, aumento no planificado de actividad turística, ganadería

extensiva, extracción de material de arrastre, porcícolas y avícolas sin sistemas de tratamiento, prácticas agrícolas inadecuadas, conflictos por uso y manejo del suelo y del agua, incendios forestales, deficiente gestión ambiental y asentamientos humanos en zonas de riesgo.

Los POMCAs revisados corresponden a cuencas hidrográficas de diferentes zonas del país, asociados a un río principal, los cuales se describen a continuación: en el Departamento del Valle del Cauca: POMCAs del río Guadalajara (CVC, 2011b), río Yumbo (CVC, 2010), río Jamundí (CVC, 2009b) y Río-frío (CVC, 2007). En el Departamento de Cundinamarca los POMCAs del río Bogotá (CAR, 2006c), río Salitre (CAR, 2008), río Minero (CAR, 2006b) y río Ubaté-Suárez (CAR, 2006a). En el Departamento de Quindío los POMCAs del río La Vieja (CRQ, 2008), río Quindío (CRQ, 2011a) y río Roble (CRQ, 2011b). En el Departamento del Cauca, los POMCAs del río Palacé (CRC, 2010a), río San Jorge (CRC, 2010c) y río Quinamayo (CRC, 2010b) y en el Departamento de Risaralda los POMCAs del río Otún (CARDER, 2005) y río Campoalegre (CARDER, 2008).

De igual forma, se pueden tipificar los problemas en microcuencas a través de los siguientes estudios: río La Piedrahíta (Romaña, 2006), quebrada Obando (CVC, 2009a); quebrada El Doncello (CORPOAMAZONIA, 2009a), quebrada Curiyaco (CORPOAMAZONIA, 2009c), quebrada La Borugo (CORPOAMAZONIA, 2009b) y microcuencas de la región andina (CIP, 2007; CONDESAN-INFOANDINA, 2003). Los principales problemas tipificados en estas microcuencas fueron: deforestación, quemas, cambio de cobertura vegetal, pérdida de biodiversidad, contaminación del recurso hídrico por vertimientos, sobreexplotación de acuíferos, erosión, invasión de áreas aledañas a ríos, pérdida de capacidad de drenaje, impermeabilización de suelos, conflictos en las comunidades, intensidad y fuerte presión por actividad agrícola, potrerización para ganadería, contaminación hídrica por aguas servidas, inadecuada disposición de residuos sólidos y líquidos, incontrolada aplicación de agroquímicos para control fitosanitario y fertilización de cultivos, poca capacitación en temas de conservación y protección ambiental de los ecosistemas.

Si bien en el país se han definido y tipificado diversos problemas en una cuenca hidrográfica, estos corresponden a listados y no están clasificados ni ponderados por subsistemas, lo que permitiría definir e implementar intervenciones de acuerdo con las prioridades en una cuenca hidrográfica. Así mismo, de la revisión anterior, se puede observar que no existen grandes diferencias entre los problemas tipificados en las microcuencas y las cuencas hidrográficas.

1.5 2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la Teoría General de Sistemas, a través de la aplicación del enfoque sistémico para la conceptualización de la cuenca hidrográfica como un sistema complejo, abierto y natural, caracterizando entradas, salidas y subsistemas asociados. Los subsistemas se definieron a partir de revisión de literatura y por la necesidad de considerar aspectos fundamentales para caracterizar y ponderar los principales

problemas en cada uno de los subsistemas definidos. La adquisición de conocimiento se desarrolló a partir de la aplicación de una encuesta estructurada, revisión de literatura y entrevista con expertos y gestores de los recursos hídricos. La encuesta estructurada se diseñó con respuestas múltiples de tipo abierto y jerarquizado, la cual se dividió en dos partes. La primera parte fue diseñada para ponderar la importancia de cada subsistema, en el proceso de planeación de una cuenca hidrográfica, y la segunda parte para identificar y ponderar los principales problemas dentro de cada uno de los 13 subsistemas definidos. En la Figura 2.1, se describen los procesos aplicados para la adquisición, resumen y análisis de conocimiento en la identificación y ponderación de los problemas en una CH en Colombia.

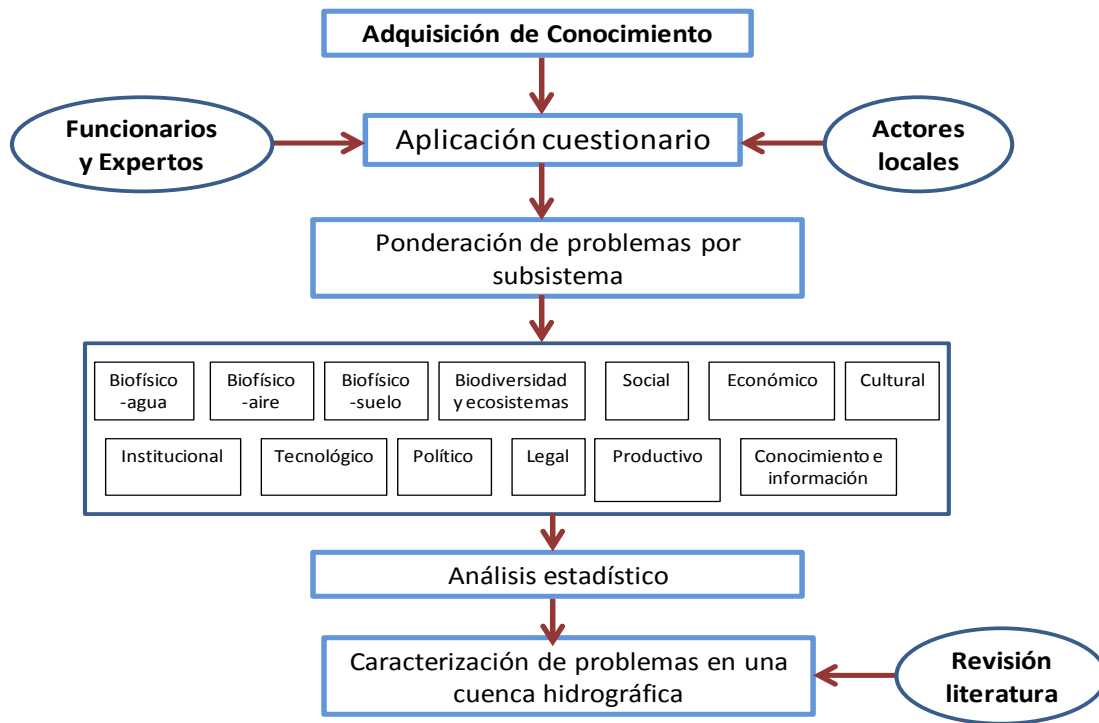


Figura 2.1 Procesos para la caracterización de los problemas en una CH en Colombia.

Se calculó el tamaño de muestra necesario para estimar los valores medios de ponderación de los problemas en una cuenca hidrográfica considerando el valor medio de ponderación en el subsistema agua, con un nivel de confiabilidad del 95%, un coeficiente de variación del 12% y un nivel de precisión del 2%, obteniéndose un tamaño mínimo de muestra de 139. Se realizaron 160 encuestas a diversos funcionarios, expertos de varias instituciones y actores de la comunidad relacionados con la gestión de los recursos hídricos. Adicionalmente, se realizaron entrevistas a miembros de la comunidad en diferentes cuencas hidrográficas: cuenca Guadalajara, cuenca Cestillal, cuenca Barbas, microcuenca Chontaduro, cuenca

Pance, cuenca Meléndez, cuenca Ibate-Suarez (Laguna Fúquene), cuenca alta del río Cauca, Laguna Sonso y microcuenca el Choco y cuenca Jequetepeque (Perú).

De las 160 encuestas realizadas, 80 encuestas (50%) se aplicaron a funcionarios de diversas áreas de conocimiento en las corporaciones autónomas regionales en Colombia: Corpocaldas, CVC, CRQ, CAS, CARDER, CDA, CAM, CDMB, Corpoamazonia, Corpoatlántico, Coralina, CRC, CAR, Corporinoquía, Asocars, DAGMA, Corponariño y Corpocuecas. Del total, 26 encuestas (16,3%) se aplicaron a funcionarios de institutos de investigación y fundaciones: IDEAM, IIAP, Instituto CINARA de la Universidad del Valle, Ingetec, Anla, Invias, Instituto de turismo, Andi, Colombia humanitaria, Fundación proaguas, Corporación Cúspide, Promasivo, Reforestamos Colombia, Fundación Tiguaní y Parques nacionales. Así mismo, 23 encuestas (14,4%) se aplicaron a funcionarios de ministerios relacionados con la gestión de recursos hídricos: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT). Por otra parte, 16 encuestas (10%) se aplicaron a funcionarios de municipios, Secretarías de Medio Ambiente y empresas prestadoras de servicios públicos de Pasto, Túquerres, Túmaco, Morales, Ocaña, Consaca y Sachacoco. Además 9 encuestas (5,6%) se aplicaron a funcionarios del sector educativo: SENA, Universidad Manuela Beltrán, UNAD y Secretaría de Educación y 6 encuestas (3,8%) se aplicaron a asociaciones comunitarias y juntas de acción comunal.

Para la ordenación, análisis y resumen de conocimiento se utilizaron procesos de la estadística descriptiva y la estadística inferencial. Se realizó un gráfico radial con las ponderaciones mínimas, medias y desviaciones estándar, obtenidas en las encuestas por cada subsistema. Se estimaron intervalos de confianza del 95% para el valor medio poblacional de la ponderación de cada uno de los subsistemas tipificados en la cuenca hidrográfica. Para caracterizar los problemas en cada subsistema y su representatividad se realizaron gráficos de barras con las frecuencias encontradas en las encuestas aplicadas.

Con el fin de establecer el grado de dependencia de la ponderación de los subsistemas evaluados y encontrar una reducción de la dimensión de estos subsistemas, se aplicó la técnica estadística del análisis factorial denominada Análisis de Componentes Principales (ACP). Esto permitirá reducir las dimensiones del sistema CH, operar mejor un modelo soporte a la decisión y proponer intervenciones en la cuenca. El procesamiento de datos de este capítulo se realizó a través del paquete estadístico SPSS Versión 20.0 y Excel de Microsoft Office.

1.6 2.4 RESULTADOS

2.4.1 El sistema cuenca hidrográfica y sus componentes

Una CH es un sistema natural, dinámico, complejo y abierto, donde convergen e interactúan diferentes subsistemas, que requieren un estudio integrado e interdisciplinario para desarrollar las estrategias para la gestión integrada del recurso hídrico (GIRH). Es así, como en este estudio se definieron 13

subsistemas para el análisis del sistema cuenca hidrográfica, como se presenta en la Figura 2.2. Se tipifican las entradas generales y específicas y las salidas tanto positivas como negativas. Esta definición evidencia la importancia de incorporar algunos componentes fundamentales en el proceso de análisis del sistema CH, que no han sido considerados en otros estudios, como son el subsistema conocimiento e información, subdividir el subsistema biofísico en los componentes agua, suelo, biodiversidad y ecosistemas y aire. De igual forma, diferenciar el subsistema económico del subsistema productivo e incluir el subsistema legal y el subsistema tecnológico. Los otros subsistemas si han estado presentes en algunos estudios. Estos subsistemas permiten caracterizar específicamente los problemas y procesos de una cuenca hidrográfica, de tal forma que se puedan identificar intervenciones a realizarse en el corto, mediano y largo plazo, diferenciando entre la cuenca alta, media y baja.

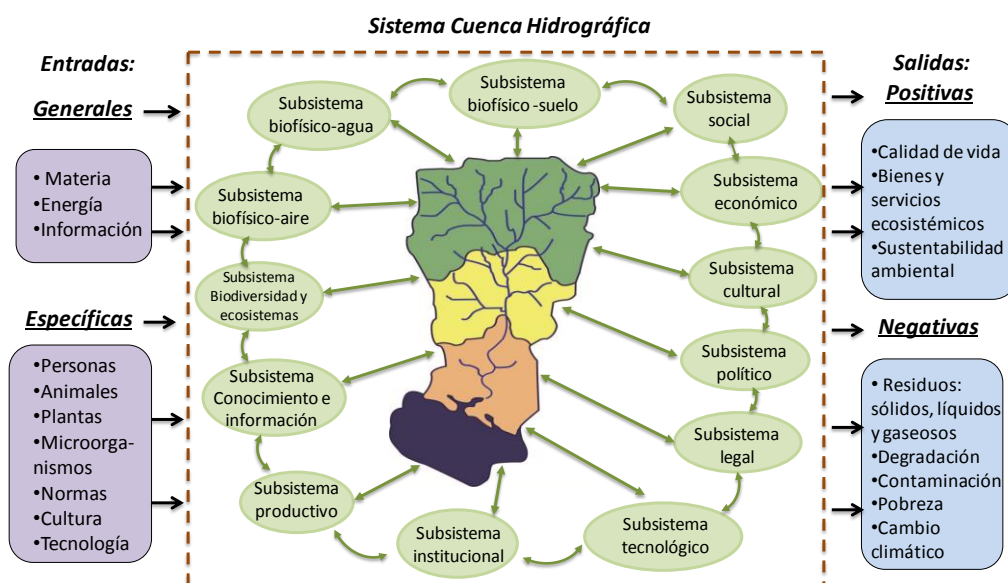


Figura 2.2 Representación esquemática del sistema cuenca hidrográfica y sus subsistemas.

De acuerdo con la encuesta aplicada, los subsistemas de mayor ponderación e importancia en la planeación de una cuenca hidrográfica son los subsistemas biofísico agua y social, con valores medios de 9,1 y 8,2 y desviaciones de 1,2 y 1,6, respectivamente, como se presenta en la Figura 2.3. La máxima calificación en cada uno de los subsistemas evaluados fue 10. En cada subsistema las puntuaciones mínimas se encuentran en el rango de 1 a 3. Por rangos del valor medio los subsistemas fueron ponderados de la siguiente forma: entre 5 y 7 el biofísico aire y tecnológico; entre 7 y 8 los subsistemas suelo, económico, político, institucional, cultural, legal, biodiversidad y ecosistemas y conocimiento e información, entre 8 y 9, el subsistema social y entre 9 y 10, el subsistema biofísico agua.

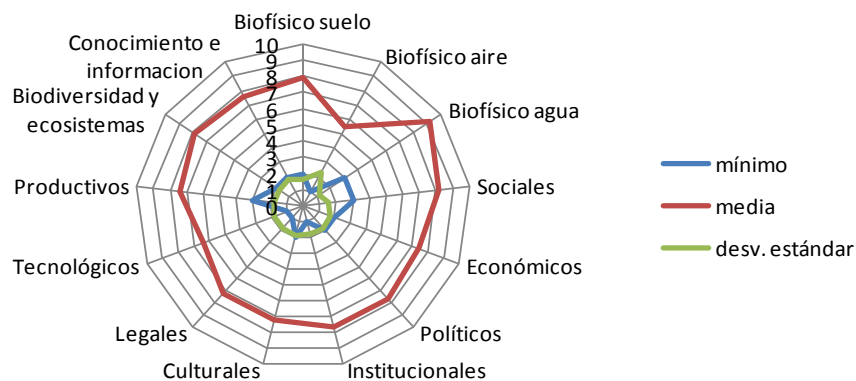


Figura 2.3 Ponderación de la importancia de los subsistemas en una CH en Colombia.

Se estimaron intervalos de confianza para el valor medio de ponderación, tal como se presentan en la Figura 2.4, donde se evidencia la alta ponderación obtenida en el subsistema biofísico agua y una menor variación de este intervalo, seguidos por los subsistemas biofísico suelo, social y biodiversidad y ecosistemas. A su vez, estos seguidos de los subsistemas económico, político, institucional, cultural, legal y productivo y por último los subsistemas tecnológicos y biofísico aire, con menor ponderación y mayor variación de intervalo.

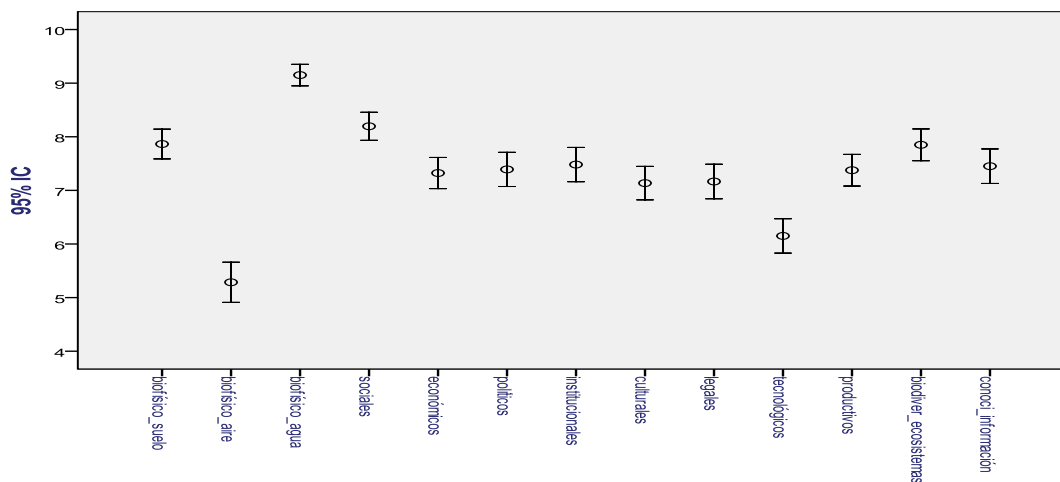


Figura 2.4 Intervalos de confianza para la ponderación de subsistemas en CH en Colombia.

2.4.2 Tipificación de problemas en una cuenca hidrográfica en Colombia por subsistema

2.4.2.1 Problemas en el subsistema biofísico-aire

Este subsistema está caracterizado por diversos procesos antrópicos que generan impactos directos en el clima y la calidad de aire en una CH. Es un subsistema compartido con otras regiones por la topografía, meteorología y el clima, este último caracterizado por la temperatura y precipitación. En Colombia, de

acuerdo con la encuesta aplicada a diversos actores de una CH, los mayores problemas en este subsistema son, en su orden, contaminación atmosférica general (CA) (26,7%), quemas e incendios forestales (13,8%), emisión de gases efecto invernadero (GEI) (11,7%) y contaminación industrial (11,3%). Estos agrupan el 63,5% de los problemas tipificados en este subsistema, como se presenta en la Figura 2.5. Este resultado coincide con Sánchez (2002) y MAVDT (2010), donde se identifica la CA como uno de los principales problemas ambientales en el país, por los impactos generados tanto en la salud como en el ambiente (MAVDT, 2010a), generando altos costos sociales y ambientales, después de la contaminación del agua y los desastres naturales (Larsen, 2004).

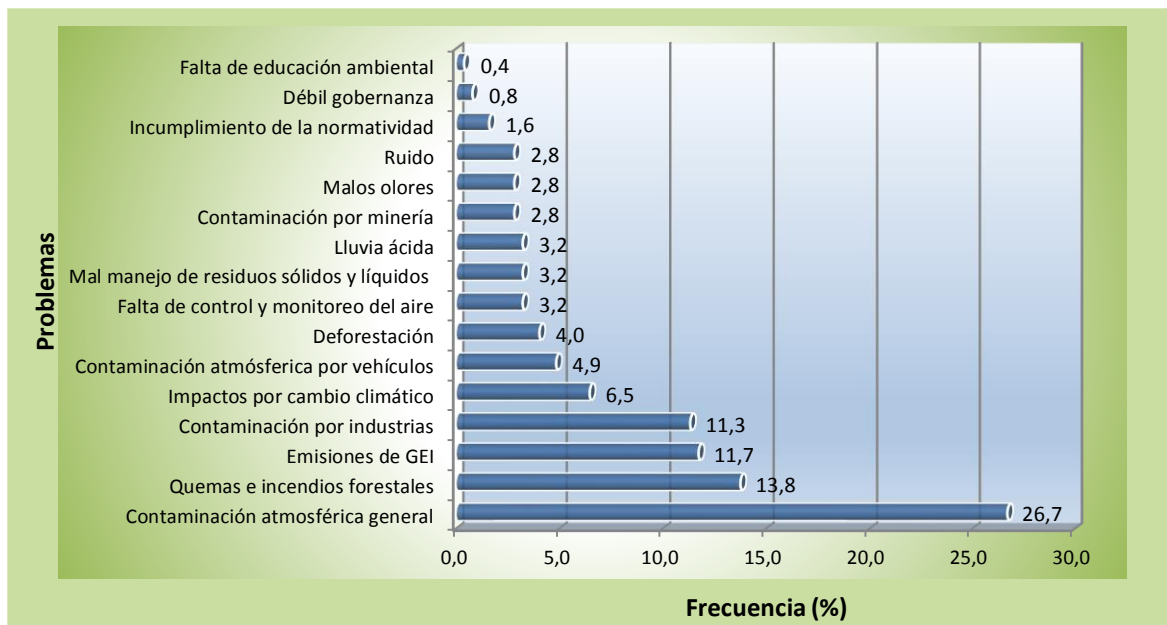


Figura 2.5 Principales problemas en el subsistema biofísico-aire en una CH en Colombia.

Otros problemas fundamentales fueron tipificados entre los que se destacan: impactos por cambio climático, contaminación por minería, falta de control y monitoreo del aire, malos olores y ruido, entre otros. Se identifican, con baja prioridad, problemas de institucionalidad y gobernanza. Generalmente, este subsistema no es considerado para la definición de intervenciones en el proceso de planeación de los POMCAs en Colombia.

2.4.2.2 Problemas en el subsistema biofísico-suelo

Este subsistema está relacionado con la problemática del recurso suelo en el país, resultado de interacciones entre aspectos socio-económicos y culturales, enmarcados en un contexto histórico, que explican gran parte de la degradación de suelos. Procesos como contaminación, salinización y prácticas culturales tradicionales complementan y explican el estado de la calidad de este recurso (Malagón, 1998).

En Colombia, de acuerdo con la encuesta aplicada a diversos actores de una CH, los cuatro principales problemas tipificados fueron: proceso de erosión (16,8%), contaminación y degradación del suelo (13,7%), conflictos por uso del suelo (11,2%) y deforestación (9,1%), estos problemas representan el 50,8% de la ponderación de este subsistema, como se presenta en la Figura 2.6.

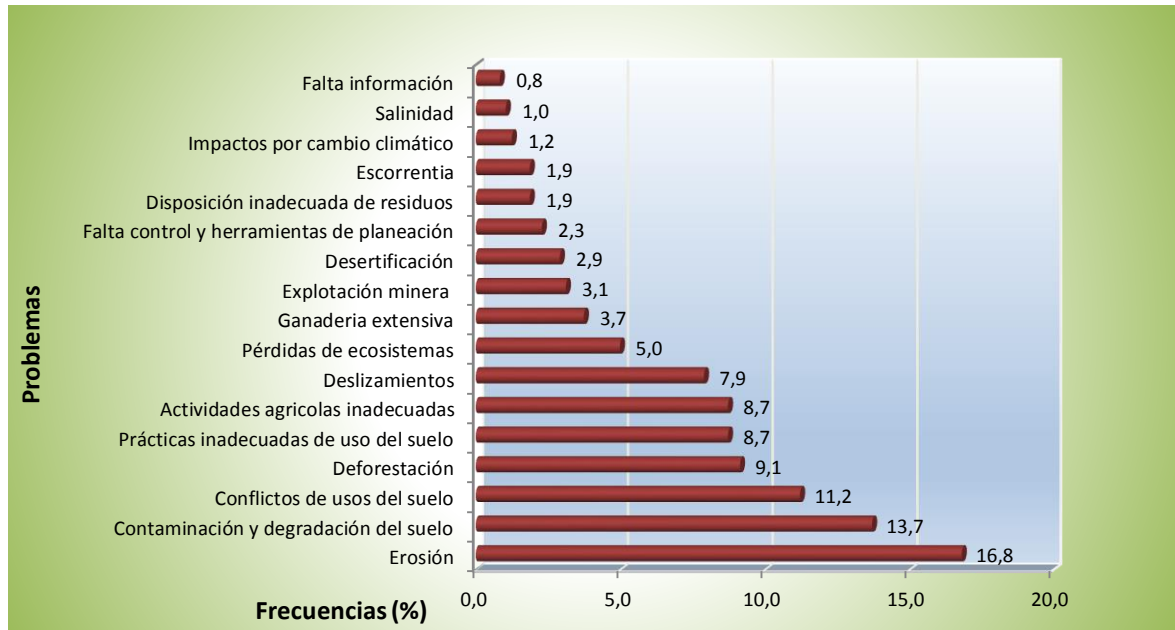


Figura 2.6 Principales problemas en el subsistema biofísico-suelo en una CH en Colombia.

De igual forma, se tipifican problemas relacionados con prácticas agrícolas como: actividades agrícolas inadecuadas y ganadería extensiva, factores fundamentales a ser considerados para la definición de intervenciones para una cuenca hidrográfica sostenible. Para varios autores, la remediación de suelos presenta una gran dificultad, tiempo y costo excesivos (Peña-Venegas y Vanegas, 2010; Silva y Correa, 2009). Para León (2001), entre las prácticas equivocadas del uso del suelo se encuentran: quemas, tala de bosques, sobrepastoreo, uso indiscriminado de plaguicidas, utilización excesiva de fertilizantes, arado permanente, desperdicio de aguas para riego, drenajes deficientes, uso de aguas salinas, uso de maquinaria y prácticas agrícolas pesada, monocultivos en áreas de pendiente y eliminación de cercas vivas y de protección arbórea a nacederos (León, 2001).

2.4.2.3 Problemas en el subsistema biofísico-agua

El subsistema agua está caracterizado por la hidráulica e hidrología en la CH formada por ríos, quebradas, embalses, lagunas, lagos, ciénagas, humedales, aguas lluvias y aguas subterráneas, incluidas las termales y las aguas oceánicas, asumiendo su cantidad y calidad y su variación tanto espacial como temporal. De acuerdo con la encuesta aplicada se tiene que los cuatro principales problemas relacionados

con el subsistema biofísico-agua en una CH en Colombia son, en su orden: contaminación general del agua (20%), manejo y vertimiento de aguas residuales (12,1%), uso ineficiente del agua (11,2%) y sequías y escases del agua (10,3%). Estos cuatro problemas representan el 53,6% de la tipificación en este subsistema, como se presenta en la Figura 2.7.

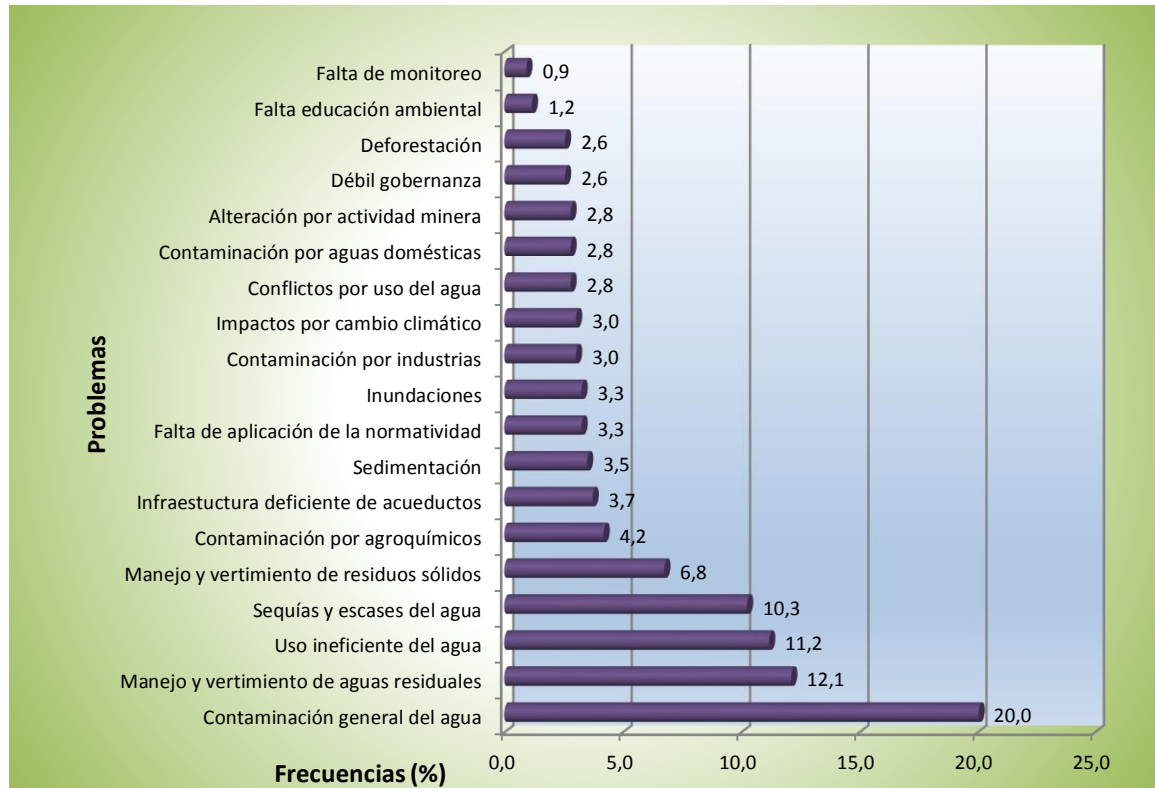


Figura 2.7 Principales problemas caracterizados en el subsistema biofísico-agua.

En este subsistema se caracterizan aspectos institucionales importantes en la gestión de los recursos hídricos tales como: débil gobernanza, falta de educación ambiental, falta de monitoreo, incumplimiento de la normatividad y conflictos por el uso del agua, este último con bajo porcentaje, contrario a lo tipificado en el subsistema bio-físico suelo, donde el conflicto por usos del suelo presentó alto porcentaje de ponderación. En Colombia, el crecimiento urbano descontrolado se caracteriza por un aumento en la demanda de agua, crecimiento de aguas residuales no tratadas, generación de residuos altamente tóxicos y vertimientos de aguas residuales en ríos y cuerpos de agua con escasa capacidad asimilativa (Quinaxi, 2007; Sánchez, 2002). La producción agrícola sigue siendo una de las principales fuentes difusas de contaminación del agua (Brezonik *et al.*, 1999). De igual manera, las fuentes hídricas son receptoras de sedimentos causados por erosión de sus suelos (Gao *et al.*, 2007). Similarmente, los efectos del cambio climático pronostican un mayor consumo y una disminución de los caudales (Naciones Unidas, 2008), pues se presentará una mayor

intensidad y duración de sequías, así como una mayor probabilidad de inundaciones con sus efectos sobre la disponibilidad de agua y su calidad.

2.4.2.4 Problemas en el subsistema biodiversidad y ecosistemas

Este subsistema está caracterizado por los diversos ecosistemas y biodiversidad presentes en la cuenca hidrográfica. En el país se presentan ecosistemas como: bosques, agro-ecosistemas, humedales, páramos, ecosistemas marinos, arroyos-ríos, áreas urbanas y sabanas y ecosistemas xerofíticos, entre otros. De acuerdo con la encuesta aplicada se tienen que los cuatro principales problemas relacionados en este subsistema en una cuenca hidrográfica en Colombia son: pérdida de biodiversidad (24,9%), deforestación y fragmentación de bosques (24,9%), pérdida de ecosistemas estratégicos (13,3%) y falta conocimiento e información (13,3%). Estos problemas representan el 76,4% de los tipificados en este subsistema. Es de resaltar la evidencia expresa del problema de falta de conocimiento e información en este subsistema, contrario a los anteriores subsistemas evaluados. También se destaca la tipificación de la baja participación institucional y comunitaria, tal como se presenta en la Figura 2.8.

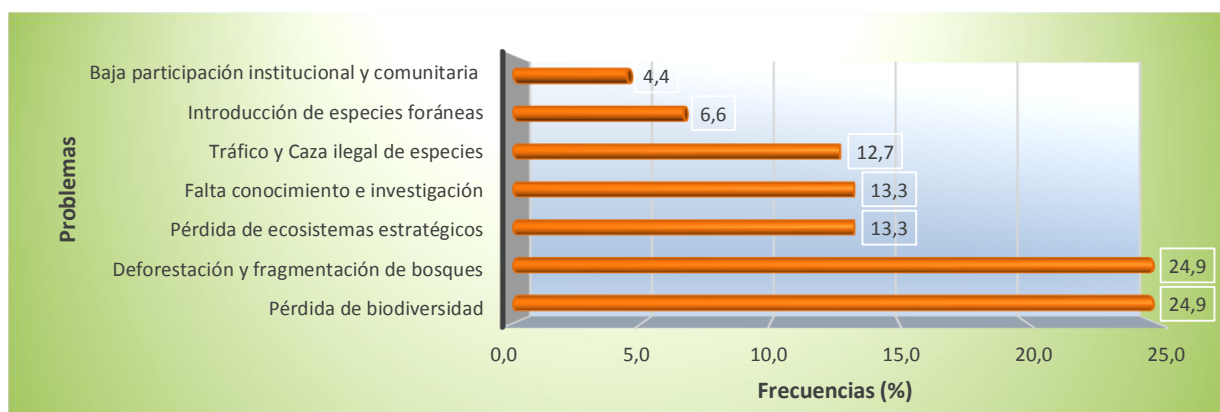


Figura 2.8 Principales problemas caracterizados en el subsistema biodiversidad y ecosistemas.

2.4.2.5 Problemas en el subsistema social

El subsistema social en una CH corresponde a elementos históricos, etnográficos y demográficos que se caracterizan por indicadores como: índice de salud, mortalidad infantil, organización y participación comunitaria, educación, servicios públicos, vivienda, uso y tenencia de la tierra, nivel de ingresos, nivel de empleo, marginación, hacinamiento en viviendas y consolidación de viviendas, entre otros. De acuerdo con la encuesta aplicada, se tiene que los cuatro principales problemas relacionados con este subsistema son, en su orden: conflictos por usos del suelo y el agua (19,7%), falta educación, cultura y conciencia ambiental (15,5%), débil participación comunitaria (14,2%) y pobreza y Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) (9,4%), tal como se presenta en la Figura 2.9. Estos problemas representan el 58,8% en este subsistema.

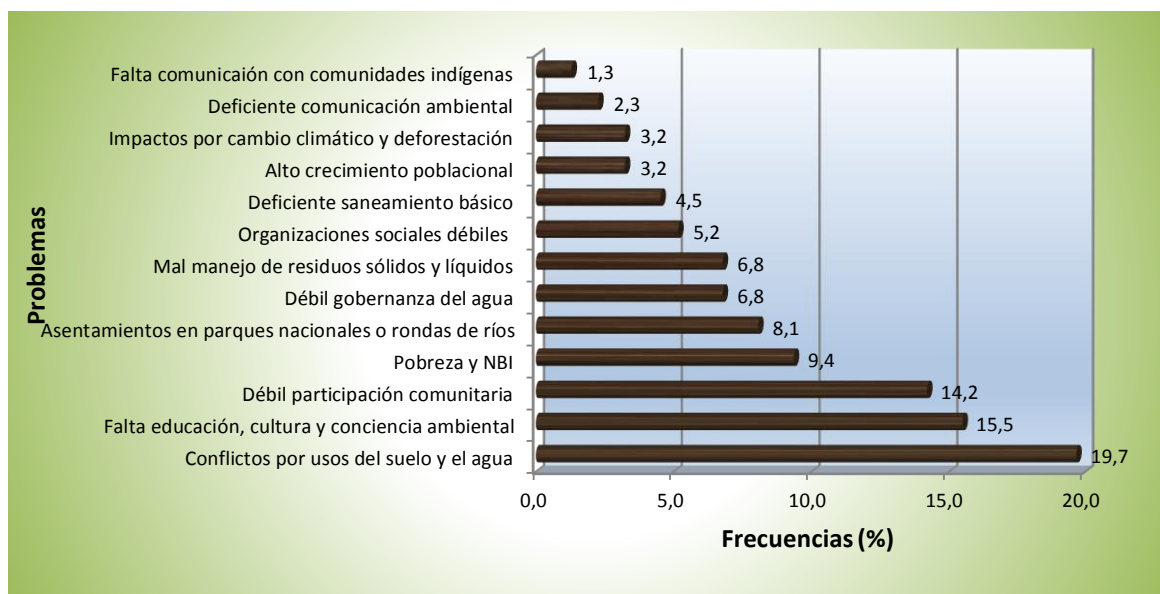


Figura 2.9 Principales problemas caracterizados en el subsistema social.

De igual forma se evidencia la tipificación de otros problemas importantes como son: gobernanza del agua, organizaciones sociales débiles, débil comunicación ambiental, falta de comunicación con comunidades indígenas y alto crecimiento poblacional. En Colombia los conflictos por el uso del agua están asociados por la asignación del recurso para actividades agropecuarias por encima de actividades domésticas, como se reporta en el caso específico del cultivo de la caña de azúcar en el Valle del Cauca (Pérez *et al.*, 2011). De igual forma, según Restrepo 2010, entre los conflictos por uso del suelo están: conflictos por subutilización, por sobreutilización, usos inadecuados, usos mineros, conflictos en áreas pantanosas por utilización agropecuaria, conflictos en áreas urbanas, conflictos legales en áreas protegidas e incompatibilidad en usos marinos y costeros (Restrepo, 2010).

2.4.2.6 Problemas en el subsistema político

El subsistema político incluye el conjunto de objetivos, principios, criterios y orientaciones para la protección del ambiente en una CH; está formado por lineamientos, agentes, instituciones, organizaciones, comportamientos, creencias, normas, actitudes, ideales, valores y sus interacciones, que mantienen o modifican el orden, conllevando a distintos procesos de toma de decisión por los diversos actores en una CH. De acuerdo con la encuesta aplicada se tienen que los cuatro principales problemas relacionados con el subsistema político en una CH en Colombia son, en su orden: corrupción (18,9%), falta de articulación y generación de política ambiental (16,2%), deficiente gestión de los recursos hídricos (14,2%) y débil gobernanza (11,7%). Estos cuatro problemas representan un porcentaje del 60,8% del total del subsistema, tal como se presenta en la Figura 2.10.

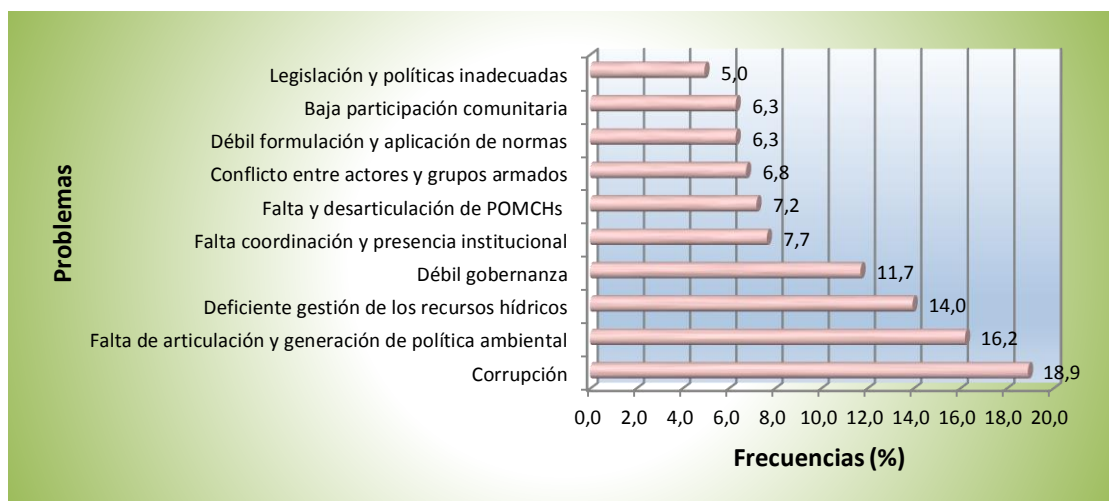


Figura 2.10 Principales problemas caracterizados en el subsistema político.

Para la CGR (2011), sólo el 9% de las cuencas priorizadas se han reglamentado; la ejecución de planes de ordenación forestal del país sólo se logró en un 18%; de las más de 4.000 especies que se reportan con algún grado de amenaza, existen planes para proteger sólo a 118; la deforestación está en 90.000 ha/año y en 2009 se reforestaron un poco menos de 48.000 has; sólo el 34% de los planes de saneamiento y manejo de vertimientos son controlados por las CAR-CDS; los compromisos establecidos en los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) apenas se cumplen en un 39%; y no existe certeza sobre el número de redes ni estaciones de monitoreo ambiental que existen en el país. Adicionalmente, la corrupción en Colombia muestra síntomas preocupantes que invocan atención de las autoridades nacionales, regionales y locales y de los diversos organismos involucrados en la definición de políticas, planificación, manejo y utilización de los recursos hídricos.

2.4.2.7 Problemas en el subsistema económico

Aunque en muchos contextos el subsistema económico está relacionado con el subsistema productivo, en esta investigación se enmarcó como el subsistema relacionado con los procesos económicos y la valoración del agua; la denominada economía del agua. De acuerdo con la encuesta aplicada se tiene que los problemas relacionados con el subsistema económico en una cuenca hidrográfica en Colombia son, en su orden: recursos escasos para POMCAs (25,6%), sobreexplotación y conflictos del uso de Bienes y Servicios Ambientales (BSA) (19,8%), bajos ingresos de la comunidad (13,2%) y el modelo de desarrollo económico (12,3%). Estos representan un porcentaje de 70,9 %, tal como se presenta en la Figura 2.11.

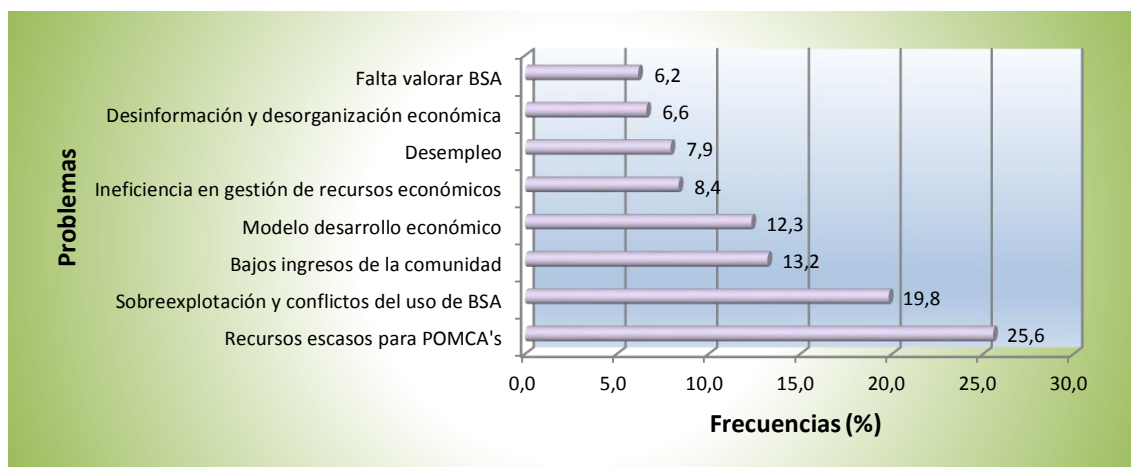


Figura 2.11 Principales problemas caracterizados en el subsistema económico.

Es importante destacar que el problema con mayor ponderación se presenta en la falta de recursos para los POMCAs, factor fundamental para la implementación de intervenciones para la gestión integrada de los recursos hídricos en el país. Sin embargo, no se mencionan mecanismos económicos, como la tasa retributiva o la tasa de uso, debido a los ínfimos valores que representan como una valoración del recurso hídrico. Lo anterior puede deberse a falta de divulgación y conocimiento de la misma por los diferentes actores de las cuencas hidrográficas. Otros problemas importantes identificados en este subsistema, son: ineficiencia en la gestión de recursos económicos, desinformación y desorganización económica y falta valorar los bienes y servicios ambientales.

2.4.2.8 *Problemas en el subsistema cultural*

El subsistema cultural está relacionado con las costumbres de la población que habita en la CH, compuesto por saberes, tradiciones, prácticas, pensamientos y arte que identifican a una población. Es un conjunto complejo, coordinado de formas que son compartidas por los humanos y se forma por un conjunto de componentes cognoscitivos, intelectuales, psico-motores, afectivos y relacionales. De acuerdo con la encuesta aplicada se tiene que los cuatro principales problemas relacionados con el subsistema cultural en una cuenca hidrográfica en Colombia son, en su orden: inadecuada cultura ambiental y cultura del agua (22,3%), desconocimiento de problemática ambiental (15,8%), débil participación comunitaria (11,9%) e inadecuadas prácticas ambientales (11,4%). Estos representan el 61,4% de los problemas tipificados, tal como se presenta en la Figura 2.12.

Es importante la identificación del principal problema como falta de cultura ambiental y cultura del agua, pues evidencia la necesidad de generar intervenciones en este sentido. En educación ambiental Colombia presentan problemas como (MAVDT, 2003; SINA, 2002): conceptualización difusa del proceso, acciones puntuales y aisladas, descoordinación de acciones por diferentes instituciones o grupos, poca racionalización de los recursos existentes, atomización de actividades, descontextualización de las acciones

realizadas, pues no se parte de un diagnóstico regional o local, ni se relacionan con los planes regionales u instrumentos de planeación como POT, Plan de Desarrollo, Planes Trienales de las corporaciones autónomas y planes de gestión ambiental regional, entre otros. Otros problemas tipificados relacionados con la educación ambiental son: ausencia de visión sistémica de los problemas ambientales y de los recursos hídricos, debilidad al explicitar la relación entre la problemática ambiental y las actividades productivas nacionales, regionales o locales.

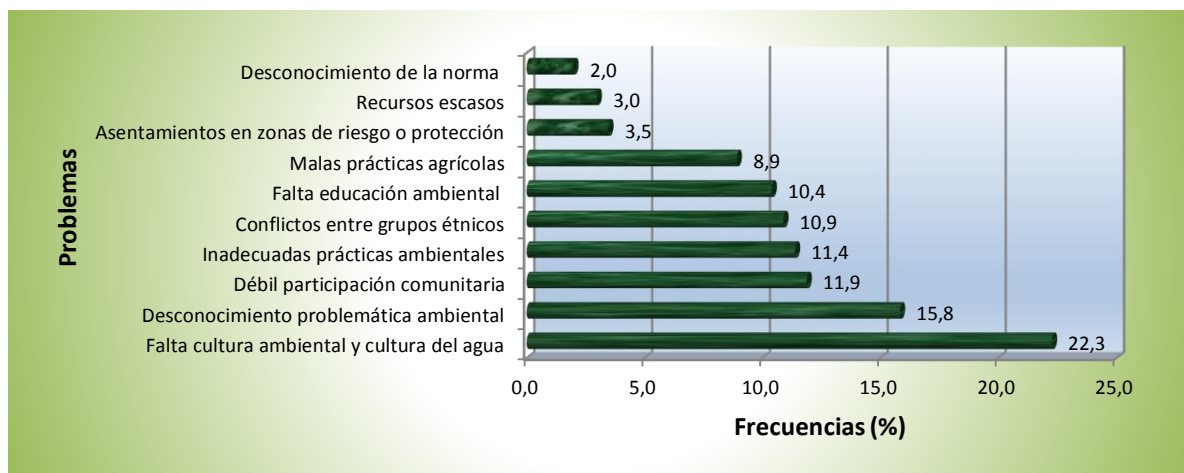


Figura 2.12 Principales problemas caracterizados en el subsistema cultural.

2.4.2.9 Problemas en el subsistema legal

El subsistema legal corresponde al ordenamiento y conjunto de normas jurídicas que rigen en un lugar determinado en una época concreta; en una cuenca hidrográfica incluye ordenamiento ecológico, programas de ordenamiento ecológico, instrumentos jurídicos, aspectos legales, planes de desarrollo y ordenamiento y otros instrumentos de planeación. De acuerdo con la encuesta aplicada, los cuatro principales problemas relacionados con el subsistema legal en una CH en Colombia son, en su orden: incumplimiento de leyes y normas (26,3%), normatividad contradictoria y desarticulada (25,4%), desconocimiento de leyes y normas (13,4%) y conflictos por usos del suelo y el agua (12,5%). Estos representan el 77,6% de la ponderación de este subsistema, tal como se presenta en la Figura 2.13.

Es de resaltar que aproximadamente el 52% de la ponderación de los problemas en este subsistema están en incumplimiento de leyes y normas y normatividad contradictoria y desarticulada, lo cual debe ser considerado para generar intervenciones y estrategias para abordar estos dos grandes problemas en Colombia. Otros problemas tipificados de gran importancia son: falta de consejos de cuenca y débil participación comunitaria y corrupción. Colombia es considerado un país rico en normatividad, pero generalmente se encuentran en conflicto, con objetivos similares, aplicadas por organizaciones e instituciones diferentes, que operan descoordinadamente.

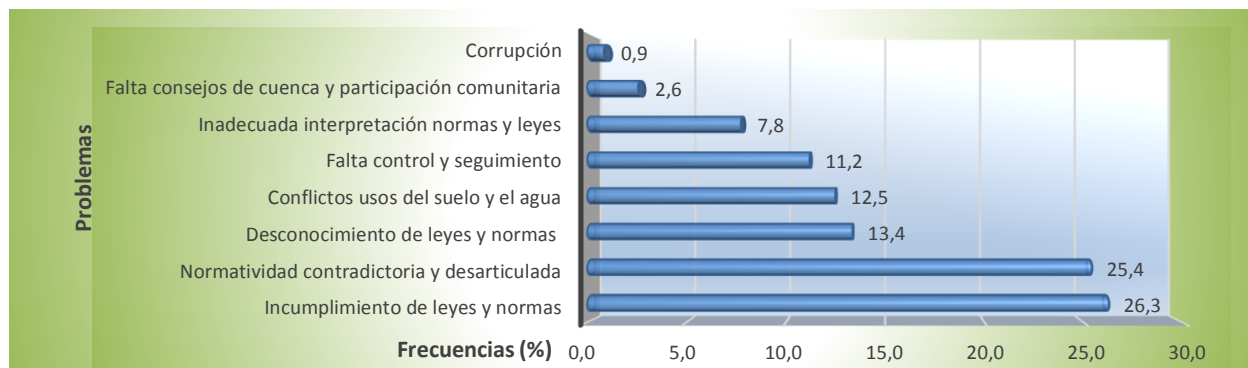


Figura 2.13 Principales problemas caracterizados en el subsistema legal.

2.4.2.10 Problemas en el subsistema tecnológico

El subsistema tecnológico se refiere a procesos y tecnologías empleadas por los diversos actores en una CH. Es un sistema compuesto de instrumentos, acciones y métodos, para transformar los diversos procesos socio-ambientales en la CH. De acuerdo con la encuesta aplicada, se tiene que los principales problemas relacionados con este subsistema en una CH en Colombia son, en su orden: baja transferencia de tecnología (20,8%), falta de acceso a tecnologías de punta (19,5%), falta recursos e investigación (14,8%) y uso inadecuado de tecnología (12,3%). Estos representan el 67,4% del total del subsistema, como se presenta en la Figura 2.14.

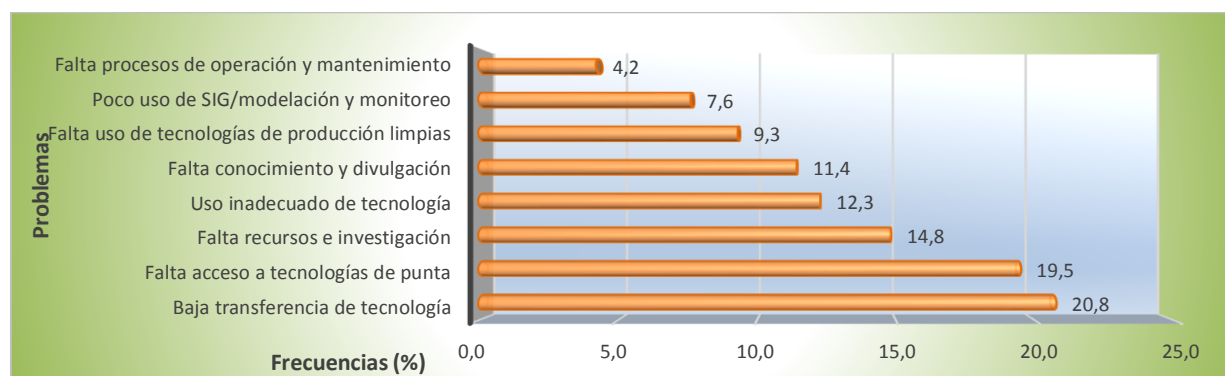


Figura 2.14 Principales problemas caracterizados en el subsistema tecnológico.

Otros problemas en este sistema son: falta de tecnologías eficientes para el tratamiento de aguas residuales, inexistencia de plantas de tratamiento para aguas residuales, limitada implementación de tecnologías limpias en procesos industriales y agrícolas, falta de programas para el reúso, reciclado y recuperación de efluentes urbanos e industriales, deficiente recolección y tratamiento de aguas de escorrentía de la minería y manejo inadecuado de residuos sólidos municipales (domésticos, comerciales e industriales). De igual forma, en los procesos agrícolas se evidencian los siguientes problemas tecnológicos: inadecuadas prácticas agrícolas, mecanización e industrialización con tecnologías con baja capacidad de implementación, baja adopción y uso transitorio de nuevas tecnologías agrícolas para conservación del suelo

y del agua, existencia de ganado en terrenos inadecuados, pocas facilidades para implementación de sistemas silvopastoriles (SSP) y sistemas agroforestales, falta de capital, bajo conocimiento y escasa disponibilidad de semillas, desconocimiento de tecnologías en el manejo sostenible de los bosques y deficiencias tecnológicas en la extracción de minerales.

2.4.2.11 Problemas en el subsistema institucional

El subsistema institucional está relacionado con mecanismos de orden social y cooperación que procuran normalizar el comportamiento de un grupo de individuos, incluye normas de conducta y costumbres consideradas importantes para una sociedad, además de reglas formales y no formales e incentivos para la participación en la toma de decisiones. La institucionalidad se puede estimar a través de la densidad y diversidad de organizaciones sociales y su integración presente para la toma de decisiones en la gestión del agua. De acuerdo con la encuesta aplicada, se tiene que los principales problemas relacionados con el subsistema institucional en una CH en Colombia son, en su orden: descoordinación institucional (29,8%), débil gestión institucional para la planeación de cuencas hidrográficas (19,0%), escasa presencia institucional (13,6%) y baja gobernanza institucional (11,6%). Estos representan el 74% de la ponderación de este subsistema, como se presenta en la Figura 2.15.

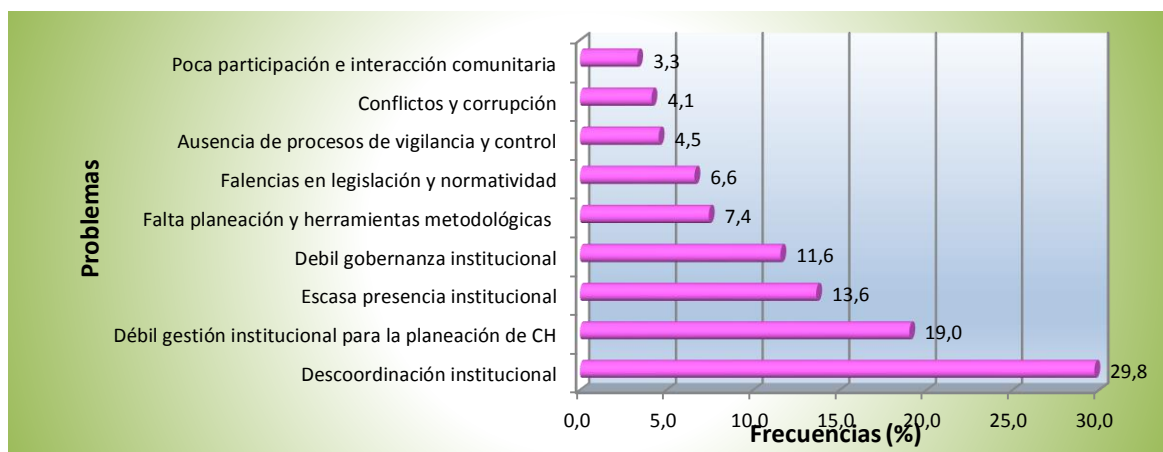


Figura 2.15 Principales problemas caracterizados en el subsistema institucional.

Generalmente, en el país se presenta que las reglas informales tienden a invalidar las reglas formales debido a que existe una débil capacidad para aplicar normas y leyes asociadas a la toma de decisiones del recurso hídrico. Igualmente, se presentan vacíos e incoherencias normativas y de política pública que generan que las CAR's enfrenten problemas en torno a territorios sobre los cuales se superponen diferentes figuras legales tales como resguardos, parques nacionales y reservas forestales, entre otros. Esta situación ha configurado un bajo posicionamiento del sector ambiental dentro de la estructura del gobierno, ha facilitado la modificación constante de la agenda del tema ambiental y ha debilitado la capacidad institucional a través de la disminución de recursos del presupuesto nacional que, entre otros, ha generado

disminución de personal de gran capacidad técnica y debilitado una de las principales funciones de las CAR's como autoridades ambientales.

2.4.2.12 Problemas en el subsistema productivo

Es el subsistema que provee la producción de bienes y servicios de acuerdo con intereses colectivos y de desarrollo económico, está integrado por actividades productivas que se realizan en la CH, tales como: agricultura, pesca, minería, ganadería, industria, servicios, manejo de recursos naturales y obras de infraestructura para vías, acueductos, asentamientos humanos, electrificación y ciudades. Incluye población económicamente activa por sector, urbanización, grado de marginación, infraestructura de servicios y sectores productivos. De acuerdo con la encuesta aplicada, se tiene que los principales problemas relacionados con el subsistema productivo en una CH en Colombia son, en su orden: inadecuadas prácticas agrícolas (27,3%), contaminación y uso de suelos y agua (15,3%), producción insostenible (14,4%) y conflictos usos del suelo (12,9%). Estos representan cerca del 69,9% de este subsistema, tal como se presenta en la Figura 2.16.

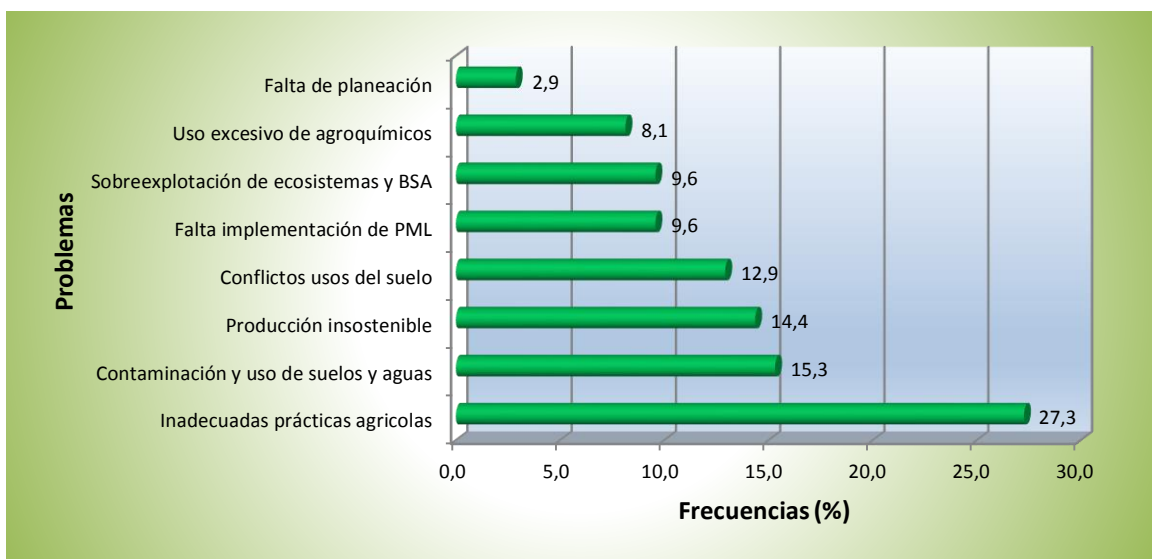


Figura 2.16 Principales problemas caracterizados en el subsistema productivo.

Es de resaltar que el problema relacionado con malas prácticas agrícolas presenta un alto porcentaje, lo cual sugiere que se deben generar intervenciones que permitan mitigar esta situación. En Colombia, las autoridades ambientales no promueven estrategias de producción más limpia (PML) y la base tecnológica de muchas empresas tradicionalmente más contaminantes como; curtiembres, fundición, alimentos, galvanoplastia, entre otras, no implementan tecnologías y prácticas de PML. Otros problemas del sector productivo son (Arango *et al.*, 2000): resistencia al cambio, visión de corto plazo, incapacidad de entender la globalización, formación profesional universitaria contraria a la innovación, desconocimiento de mecanismos y débil gestión que realizan las CARs para promoción y fomento de una cultura de PML.

2.4.2.13 Problemas en el subsistema conocimiento e información

Este subsistema está relacionado con las capacidades para integrar los procesos de recolectar, sistematizar y transferir conocimiento. Incluye la creación de conocimiento, invención e innovación, educación, formación y transmisión de conocimiento. Además, generación de datos, información y metodologías para el apoyo a la toma de decisiones en la gestión integrada del recurso hídrico. De acuerdo con la encuesta aplicada, los principales problemas relacionados con este subsistema son, en su orden: falta información ambiental (26,8%), débil proceso de divulgación y comunicación (23,2%), falta conocimiento del estado de los recursos naturales (RN) (17,3%) y falta de educación y cultura ambiental (10,6%). Estos representan el 77.9% del total de esta subsistema, tal como se presenta en la Figura 2.17.

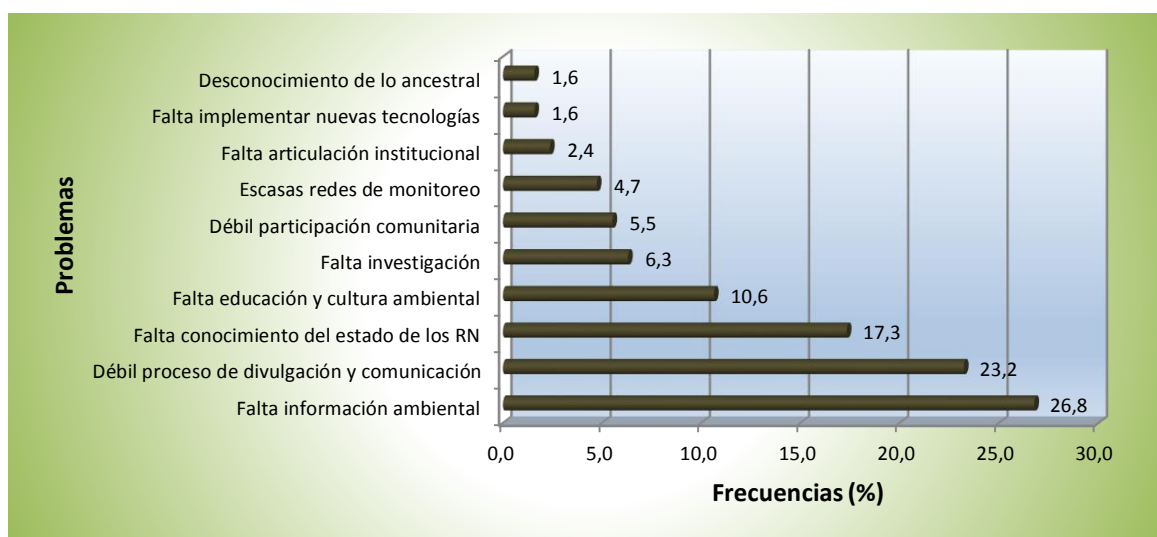


Figura 2.17 Principales problemas caracterizados en el subsistema conocimiento e información.

En Colombia, uno de los grandes problemas en el sector ambiental es la ausencia de sistematización, agregación y consolidación de información que apoye la toma de decisiones. La ausencia de información disponible y comparable, que permita realizar una evaluación del avance en términos reales sobre la mejora en cantidad y calidad de los recursos naturales disponibles en el país, es un obstáculo para la planeación de los recursos hídricos. Los problemas alrededor de la generación, mantenimiento y disponibilidad de sistemas de información robustos y confiables no han permitido el establecimiento de una línea base nacional que sirva como punto de referencia para la determinación del avance o retroceso de la calidad ambiental (CGR, 2011). Por ejemplo, existe un débil sistema de información que no cumple características de dinámico, actualizado, operativo y transparente, requerido para controlar las concesiones y los permisos de vertimiento (Rudas, 2005).

1.7 2.5 EVALUACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL SISTEMA CUENCA HIDROGRÁFICA

Se utilizó la técnica estadística multivariada de análisis de componentes principales (ACP), con el fin de evaluar y reducir el número de subsistemas definidos para la PCH, considerando que puede ser complejo abordar todas las dimensiones en una primera aproximación a un sistema soporte a las decisiones. A partir de la ponderación de los principales problemas en una CH en cada uno de los 13 subsistemas y aplicando ACP se generó la matriz factorial de vectores propios rotados, que genera cuatro componentes principales como se presenta en la Tabla 2.1. En color rojo aparecen los subsistemas más fuertemente relacionados en cada componente y estos a su vez generan un nuevo subsistema.

Tabla 2.1 Vectores propios de cuatro primeros componentes de 13 subsistemas evaluados.

Subsistema	Componente			
	1	2	3	4
Institucional	,815	-,059	,190	,118
Político	,768	,219	-,013	,144
Cultural	,648	-,143	,130	,209
Biofísico_suelo	,145	,801	-,073	,201
Biofísico_agua	-,071	,736	,149	,193
Biodiver_ecosistemas	-,161	,620	,518	,071
Biofísico_aire	,383	,575	,316	-,317
Conoci_información	,198	,027	,773	,026
Productivo	-,160	,205	,653	,554
Tecnológico	,478	,143	,557	,078
Legal	,475	,168	,540	,146
Económico	,375	,161	,115	,722
Social	,444	,207	,109	,659

Es así como se tiene que el primer componente contiene los subsistemas político, institucional y cultural, en esta medida este nuevo subsistema se puede denominar político-institucional. En el segundo componente están los subsistemas legal, tecnológico, productivo e información y conocimiento, este nuevo subsistema se puede denominar tecnológico. El tercer componente está asociado a los componentes biofísicos, al agrupar los subsistemas, bio-físico agua, bio-físico suelo, bio-físico aire y biodiversidad y ecosistemas, en este sentido se puede denominar el subsistema bio-físico. El cuarto componente contiene los subsistemas social y económico, en este sentido se puede denominar el subsistema socio-económico. Cada componente ha generado un nuevo subsistema y estos a su vez un nuevo marco para el análisis del sistema cuenca hidrográfica como se presenta en la Figura 2.18.

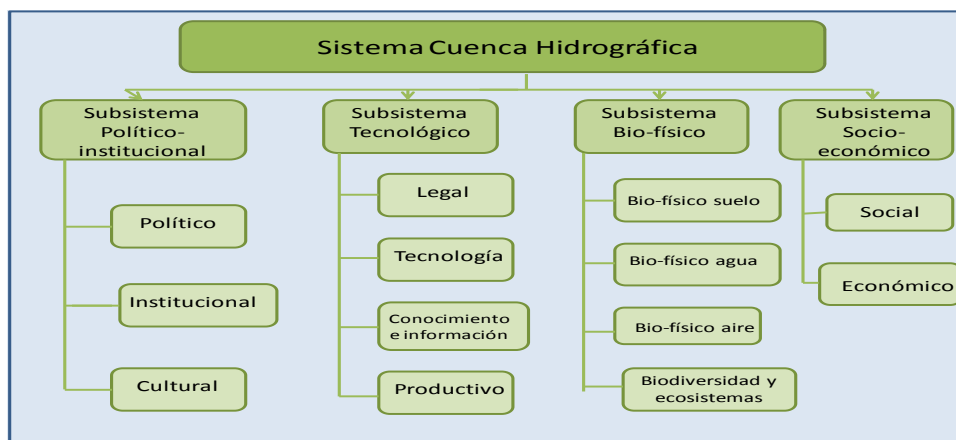


Figura 2.18 Nueva definición del sistema cuenca hidrográfica y sus principales componentes

1.8 2.6 DISCUSIÓN

El sistema CH fue conceptualizado como un sistema compuesto por 13 subsistemas: biodiversidad y ecosistemas, bio-físico agua, bio-físico suelo, bio-físico aire, productivo, tecnológico, legal, político, institucional, cultural, social, económico y conocimiento e información. Esta definición complementa los subsistemas definidos por Salomón *et al.* (2008), Avalles (2008), CINARA (2011), CATIE (2006) y MADS (2013). La caracterización del sistema CH con 13 subsistemas permite a diversos actores y tomadores de decisiones considerar el sistema CH como un sistema complejo donde interactúan diversos subsistemas que deben ser considerados en la de toma de decisiones para el proceso de planeación de una cuenca hidrográfica (PCH).

A través del proceso de gestión de conocimiento se generó una tipificación y jerarquización de los principales problemas de una CH en Colombia, clasificados en cada uno de los 13 subsistemas definidos. El subsistema con mayor calificación para la toma de decisiones en la PCH fue el subsistema bio-físico agua, seguido del subsistema social y los de menor calificación fueron el subsistema tecnológico y el subsistema bio-físico aire.

Contrario a los problemas presentados en una CH por Said (2006), Parra (2009) y Jiménez (2008), en este capítulo se presentan y ponderan los problemas de una CH en Colombia, en cada uno de los 13 subsistemas evaluados. Este capítulo permite evidenciar problemas en las CH que no se presentan en general en los POMCAs, entre los que se destacan: cambio climático, lluvia acida, falta de herramientas de planeación, contaminación difusa por agroquímicos, falta de aplicación de normatividad, falta de conocimiento e investigación, baja gobernanza del agua, corrupción, cultivos ilícitos, grupos armados, falta de articulación y generación de política ambiental, bajos recursos para planes de cuencas hidrográficas, desinformación, desorganización económica, falta cultura ambiental y cultura del agua, normatividad contradictoria y desarticulada, falta de comités de cuencas hidrográficas y falta de trabajo interinstitucional, entre otros.

En Colombia, la mayoría de problemas tipificados en una CH o una microcuenca están relacionados fundamentalmente en el sub-sistema biofísico, entre los que se destacan: deterioro de la calidad de agua, deforestación, vertimiento de aguas residuales sin tratamiento, manejo inadecuado de residuos sólidos, degradación y mal manejo de suelos, entre otros.

Los diversos subsistemas definidos, la tipificación y jerarquización de los problemas en una CH para Colombia, deberían contribuir a agilizar la fase de diagnóstico de los POMCAs, en la medida que pueden ser considerados desde el inicio del proceso de planeación, permitiendo definir objetivos de manejo de forma ágil y eficiente y generar intervenciones que permitan mitigar o remediar cada uno de los principales problemas en cada subsistema estudiado. De igual forma, la base de conocimiento generada que identifica los problemas en una CH en Colombia, puede utilizarse para otras escalas como: microcuenca, subcuenca, cuenca y gran cuenca. Aunque, a nivel de intervenciones, es importante reconocer y considerar el orden en cada escala, la variación espacial y temporal en las mismas. Adicionalmente, es importante resaltar que los problemas tipificados en cada subsistema no presentan un análisis de causa-efecto, por lo que algunos problemas son causas o consecuencias de otros. En este sentido, es necesario aplicar otras herramientas, como el análisis Presión-Estado-Respuesta (PER), que permita abordar los diversos problemas ya identificados, en un proceso de causa-efecto.

Definir el sistema cuenca hidrográfica como un sistema complejo compuesto de 13 subsistemas permite dimensionar los diversos componentes presentes en una CH y tipificar y ponderar los problemas en cada uno de ellos, lo que genera una base de conocimiento importante para el apoyo a la toma de decisiones en la gestión integrada de los recursos hídricos, sin embargo, conceptualizar y operar un sistema soporte a las decisiones con estos 13 subsistemas, puede ser una tarea dispendiosa en una primera aproximación, por lo cual, se resumieron los 13 subsistemas en 4 principales subsistemas: político-institucional, tecnológico, bio-físico y socio-económico, con sus respectivos componentes.

1.9 2.7 CONCLUSIONES

En este capítulo, el sistema CH fue conceptualizado como un sistema complejo compuesto por 13 subsistemas: biodiversidad y ecosistemas, bio-físico agua, bio-físico suelo, bio-físico aire, productivo, tecnológico, legal, político, institucional, cultural, social, económico y conocimiento e información. Esta conceptualización permitió generar una base de conocimiento con la tipificación y jerarquización de los principales problemas de una cuenca hidrográfica en Colombia. Se evidenció la importancia del uso del enfoque de sistemas y los diversos procesos de la gestión del conocimiento para el apoyo en la generación de la base de conocimiento sobre los problemas de las cuencas hidrográficas del país.

En Colombia, el principal problema definido en cada uno de los trece subsistema evaluados para una cuenca hidrográfica fueron: contaminación atmosférica, erosión, contaminación del agua, pérdida de biodiversidad, conflictos por uso del suelo y el agua, corrupción, escasos recursos para los procesos de

planeación y ordenación de cuencas, falta de educación y cultura del agua, incumplimiento de leyes y normas, baja transferencia de tecnología, descoordinación institucional, inadecuadas prácticas agrícolas y falta de información ambiental. De estos, los más representados en los POMCAs en el país, son los bio-físicos como erosión, contaminación del agua, pérdida de biodiversidad y conflictos por el uso del agua, sin embargo, otros problemas identificados en este estudio, no forman parte de estos POMCAs, como: conflictos por el uso del suelo, contaminación atmosférica, corrupción, escasos recursos para PCH, incumplimiento de leyes y normas, baja transferencia de tecnología, descoordinación institucional, inadecuadas prácticas agrícolas y falta de información ambiental.

El conocimiento debe considerarse un insumo fundamental para la toma de decisiones en la gestión integral del recurso hídrico a través de la planeación de las cuencas hidrográficas y la gestión del conocimiento el proceso para su modelación. Aunque la gestión del conocimiento está muy desarrollada en la búsqueda de organizaciones y empresas inteligentes, es posible aplicar este proceso como un apoyo para la generación, sistematización y divulgación de conocimiento para la planeación de cuencas hidrográficas.

Con el fin de generar un sistema soporte a las decisiones se utilizarán los subsistemas configurados a través del proceso de análisis de componentes principales: político-institucional, tecnológico, bio-físico y socio-económico, y sus respectivos componentes, para la toma de decisiones en la planeación de microcuencas andinas.

3. PROPUESTA DE UN MODELO CONCEPTUAL PARA LA PLANEACIÓN DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

3.1 INTRODUCCIÓN

Los modelos conceptuales son herramientas no cuantitativas que identifican los principales aspectos para el manejo de un sistema específico, de tal forma que contribuyan a la toma de decisiones. En este capítulo se propone un nuevo modelo conceptual en el marco del desarrollo sustentable, para la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH). El modelo incluye 16 ejes transversales fundamentales. En cada eje se describen las principales intervenciones recomendadas para la GIRH. De igual forma, se definen estrategias espaciales y temporales para ser consideradas dentro del proceso de planeación de cuencas hidrográficas. Adicionalmente, se propone el proceso de planeación de una cuenca hidrográfica (PCH) como un sistema compuesto de tres subsistemas: organizativo, gestión de conocimiento, y monitoreo y evaluación.

3.2 REVISIÓN DE LITERATURA

3.2.1 Modelos conceptuales

Un modelo conceptual (MC) es una descripción de la realidad en términos de descripciones verbales, ecuaciones, relaciones o leyes naturales que se proponen describir la realidad; puede incluir descripciones matemáticas o descripción del flujo de procesos (Refsgaard y Henriksen, 2004). Mientras para Tian *et al.*, (2010) es una herramienta filosófica, abstracta y cualitativa y es una representación externa consistente con el conocimiento científico existente (Tian *et al.*, 2010). En un MC el conocimiento de diversos expertos puede ser incluido (Znidarsic *et al.*, 2006).

El MC representa gráficamente procesos y relaciones entre un sistema y responde a preguntas de qué componentes y procesos son esenciales para la dinámica espacio temporal del sistema, y por qué y cómo se deben tener estos en consideración (Gertseva y Gertsev, 2006). Los MC son expresiones simbólicas sobre la regulación de sistemas complejos y permiten su comprensión; son herramientas analíticas de evaluación y de comunicación; son una aproximación al fenómeno estudiado, son imperfectos, dependen del modelador, su experiencia e información y son dinámicos, por lo que deben ser evaluados y actualizados en el tiempo. Aunque un MC podría verse simple y poco sofisticado, en comparación con otros modelos más intrincados, estos modelos están lejos de ser triviales (Refsgaard y Henriksen, 2004).

3.2.2 Modelos conceptuales para la planeación de cuencas hidrográficas

Diversos MC se han desarrollado para la planeación de cuencas hidrográficas, tanto a nivel nacional como a nivel internacional. A nivel nacional se encuentran: la Guía Técnico Científica del IDEAM, que guía el desarrollo de las fases en la formulación de los planes de ordenamiento y manejo de una cuenca hidrográfica (POMCA), esta guía define los siguientes ejes para la planeación: enfoque de cambio,

planeación permanente, manejo integral, enfoque participativo y enfoque sistémico (IDEAM, 2009). De igual forma, la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico en el país (MAVDT, 2010c). Esta política tiene los siguientes ejes como marco conceptual: balance hídrico (oferta y demanda), ordenamiento del recurso (asignación de usos), reglamentación de corrientes (distribución de caudales), seguimiento y evaluación (monitoreo), fortalecimiento institucional y gobernabilidad.

Mientras, la CAR (2006) emplea los siguientes ejes para el plan de ordenamiento del río Bogotá: sostenibilidad económica y financiera, conservación y manejo sostenible de la biodiversidad, la cuenca hidrográfica como unidad prioritaria de planificación y gestión, articulación de la planificación con la gestión territorial, coordinación y participación interinstitucional y comunitaria, producción limpia y mejoramiento de la calidad de vida (CAR, 2006c). Para Quinaxi (2007), se deben considerar los siguientes ejes: conservación de la oferta, gestión de la demanda, mejor gobernanza y gestión sostenible, a través de los siguientes ejes transversales: planificación, normatividad, participación y educación, investigación, tecnología e información e instrumentos de gestión.

A nivel internacional, el CIAT (2003) plantea que la planeación de cuencas debe integrar cuatro ejes: interacción agua-suelo, interacción partes altas y partes bajas, servicios ambientales y manejo basado en la comunidad, mientras la EPA (2008) considera los siguientes ejes: explotación forestal, silvicultura, agricultura, animales, uso de la tierra residencial, construcciones residenciales, carreteras y caminos (EPA, 2008). Para la FAO (2006), los ejes para la PCH son: enfoque multisectorial, planeación de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo, monitoreo y evaluación, evaluación ambiental de las intervenciones, redes entre actores, aspectos socioeconómicos, culturales y naturales, balance de género en la toma de decisiones, enfoques para intercambio de conocimiento y aprendizaje, sostenibilidad financiera, mecanismos de compensación, creación de capacidades, reforma de la gobernanza, integración de agua superficial, agua subterránea y aguas costeras, pasar del suministro a la demanda de agua, eficiencia en el uso del agua, control de extremos hidrológicos y riesgos naturales, gestión integrada del agua, vegetación, suelos y sedimentos (FAO, 2006).

Para Phillip (2011), la PCH debe considerar los siguientes ejes: sociedad, medioambiente, economía, espacio y tiempo, a través de una planeación estratégica que involucre investigación y demostración, participación de diversos actores, transición y toma de decisiones integrales. Mientras para Vishnudas *et al.* (2008), se deben considerar cuatro ejes: recursos naturales, tecnología, instituciones y economía (Vishnudas *et al.*, 2008). Por su parte CATIE (2006), evidencia cinco ejes básicos: la cuenca como sistema, el enfoque socio-ambiental y de cogestión, la cuenca como unidad de planificación y de

evaluación del impacto, el agua como recurso integrador de la cuenca y reducción de la vulnerabilidad y riesgo de desastres naturales.

Para CEPAL (2006) se deben considerar: complementariedad, descentralización, valoración de la diversidad, desarrollo territorial sostenible, prevención, participación de la sociedad civil y acceso a la información y el conocimiento (CEPAL, 2006). Para Jiménez (2005), las estrategias para la gestión de cuencas deben involucrar: intervención por microcuencas, creación de capacidades de gestión, participación concertada, extensión facilitadora, capacitación y educación, acción-investigación participativa, manejo adaptativo, sistematización de experiencias, aprovechar experiencias aprendidas, coordinación institucional y local, fortalecimiento de la capacidad local, ordenamiento territorial, promoción e incorporación de tecnologías limpias, mecanismos y alternativas financieras y sostenibilidad de las acciones (Jiménez, 2005).

Otros modelos conceptuales relacionados con la PCH, presentan ejes como: investigación académica, gobernanza, fortalecimiento de capacidades y toma de decisiones (Tanaka, 2008); desarrollo, restauración y mitigación de hábitats, agua subterráneas, cambio climático, regulación de uso del suelo, regulación de fuentes puntuales y no puntuales, crecimiento poblacional y cultivos agrícolas (Reiter *et al.*, 2009); uso del suelo, especies exóticas, calidad del agua y demanda de agua (Gentile *et al.*, 2001).

Sin embargo, pese a los modelos conceptuales presentados, para Ovalles *et al.* (2008) en la PCH ha prevalecido una concepción hidrológica, dominada por el conocimiento de aquellos elementos del subsistema físico-natural, que encuentra en el cauce principal y sus ríos tributarios el hilo conductor del conocimiento y sus aplicaciones. Por lo anterior y considerando los cambios surgidos en la última década, como son: crecimiento poblacional, crecimiento urbano, cambio climático y aumento en los niveles de conflicto, entre otros, se deben integrar y ampliar los ejes fundamentales para la PCH, de tal forma que apoyen la toma de decisiones para la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH).

El sistema cuenca hidrográfica es de gran complejidad debido a la gran cantidad y naturaleza diversa de sus componentes y la interacción dinámica entre estos (Victoria *et al.*, 2005). Un MC para la PCH provee opciones para integrar conocimiento y perspectivas de las ciencias sociales y naturales en la planeación, generación de políticas y toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos (Tezer *et al.*, 2012). Sin embargo, en relación con la planeación de cuencas hidrográficas las investigaciones en esta área están principalmente enfocadas a aspectos puntuales, es así como los aspectos donde más se encuentra información sobre la planeación de cuencas hidrográficas son los aspectos de calidad y cantidad de agua (Yang y Li, 2011).

3.2.2 El proceso de planeación de cuencas hidrográficas

La planeación de cuencas hidrográficas (PCH) es el proceso que sirve de herramienta a los tomadores de decisiones para definir políticas y estrategias para la GIRH, permite seleccionar

intervenciones para el cumplimiento de los objetivos en la CH. La PCH es un proceso iterativo, holístico, geográficamente definido, integrado y cooperativo (EPA, 2008); es un proceso dinámico, complejo, que requiere el trabajo conjunto de múltiples disciplinas, múltiples usuarios con múltiples objetivos (Rouhani y Kangari, 1987). La PCH debe considerar múltiples propósitos, desarrollo integrado y generación de intervenciones aceptables (De Kok *et al.*, 2009). Según Moreno (2007), la planeación debe tener los siguientes procesos: priorización, planificación, intervención, monitoreo y evaluación (Moreno *et al.*, 2007). En Colombia, la PCH se viene desarrollando usando las siguientes etapas: aprestamiento, diagnóstico, prospectiva, formulación, ejecución, y seguimiento y evaluación (IDEAM, 2007; IDEAM, 2009; MMA, 2002). Estas etapas se aplican de manera lineal y no presentan el proceso de PCH como un sistema iterativo, holístico y complejo, donde se integren y retroalimenten los diversos componentes. De igual forma la gestión de conocimiento está ausente en este proceso.

1.10 3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo conceptual presentado en este capítulo se construyó utilizando la Teoría General de Sistemas (TGS), el enfoque de sistemas y gestión de conocimiento (GC). La metodología utilizada fue de carácter cualitativo que consistió en la construcción del modelo conceptual a partir de proposiciones extraídas de un cuerpo teórico que sirve de punto de partida para la Planeación de Cuencas Hidrográficas (PCH). El método cualitativo permite la construcción de teorías, a partir de observaciones de la realidad objeto de estudio, haciendo uso del método inductivo (Martínez, 2006). La TGS concibe la realidad como una totalidad sistémica y pone en evidencia la presencia de paralelismo o analogías estructurales entre fenómenos de naturaleza diferente y a la vez dar bases para una teoría integradora de la organización de la complejidad (Andrade, 2007).

Para desarrollar el modelo conceptual de planeación (MCP) de una CH, que identifica los ejes fundamentales de planeación y describir el proceso de planeación como un sistema, se desarrollaron diversas estrategias metodológicas para adquirir, sistematizar y resumir el conocimiento, las cuales se presentan a continuación:

- Visitas estructuradas a cuencas hidrográficas: se realizó el recorrido físico de las siguientes cuencas: cuenca Guadalajara, cuenca Cestillal, cuenca Barbas, microcuenca Chontaduro, cuenca Pance, cuenca Meléndez, cuenca Ibate-Suarez (Laguna Fúquene), cuenca alta del Cauca, Laguna Sonso y microcuenca el Choco y cuenca Jequetepeque (Perú).
- Entrevistas con actores de cuencas y microcuencas visitadas: líderes comunitarios y pescadores de la Laguna de Sonso, pescadores y líderes comunitarios del embalse de Salvajina, líderes comunitarios quebrada Chontaduro (zona rural de Cali), líderes comunitarios y operadores de la planta de agua potable de la microcuenca de la quebrada el Chocho, areneros del Cauca, operadores de planta de agua potable de la ciudad de Buga, operadores de la reserva natural de Yotoco, operadores acueducto

Tribunas Córcega (Barbas), operadores turísticos y operadores de planta de agua potable la Vieja, operadores turísticos y operadores planta de tratamiento de agua potable en el municipio de Salento y Parque del Cócora, productores de gelatina en Andalucía –Valle del Cauca y operadores planta de agua residual de Santiago de Cali.

- Entrevistas con funcionarios de instituciones relacionadas con la gestión de los recursos hídricos: Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y Desarrollo Sostenible (ASOCARS), Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), Instituto de Estudios Ambientales (IDEA-UNAL-Bogotá), Instituto de Estudios Ambientales (IDEA-UNAL-Medellín), Instituto de Estudios Ambientales (IDEA-UNAL-Manizales), Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (CENICAÑA) y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)
- Revisión estructurada de literatura relacionada con la PCH, los procesos e intervenciones para cada uno de los ejes definidos en el MCP.

A través de lo anterior, se define el modelo conceptual de planeación de cuencas hidrográficas (MCP), que incluye un conjunto de conceptos fundamentales vinculados al sistema cuenca hidrográfica: se definen los ejes fundamentales a ser considerados, se tipifican las principales intervenciones propuestas a ser implementadas. Se caracteriza el proceso de PCH como un sistema y se identifican sus subsistemas, focalizados en la gestión de conocimiento.

1.11 3.4 RESULTADOS

3.4.1 Modelo conceptual para la planeación de una Cuenca Hidrográfica

El modelo conceptual para la planeación de cuencas hidrográficas (MCP) está compuesto de 16 ejes, los cuales interactúan simultáneamente, los ejes propuestos son: desarrollo sustentable para la gestión del agua, producción limpia y consumo sostenible, educación ambiental, cultura del agua, gestión del conocimiento, servicios ecosistémicos, cambio climático, monitoreo ecoambiental, ordenamiento ecológico territorial, gestión del riesgo ambiental, gobernanza del agua, institucionalidad, participación comunitaria, uso eficiente del agua, herramientas metodológicas y herramientas económicas, como se ilustra en la Figura 3.1. En cada uno de estos ejes se definen las principales intervenciones recomendadas para ser implementadas con el fin de conseguir una cuenca hidrográfica sostenible en el marco de la GIRH.

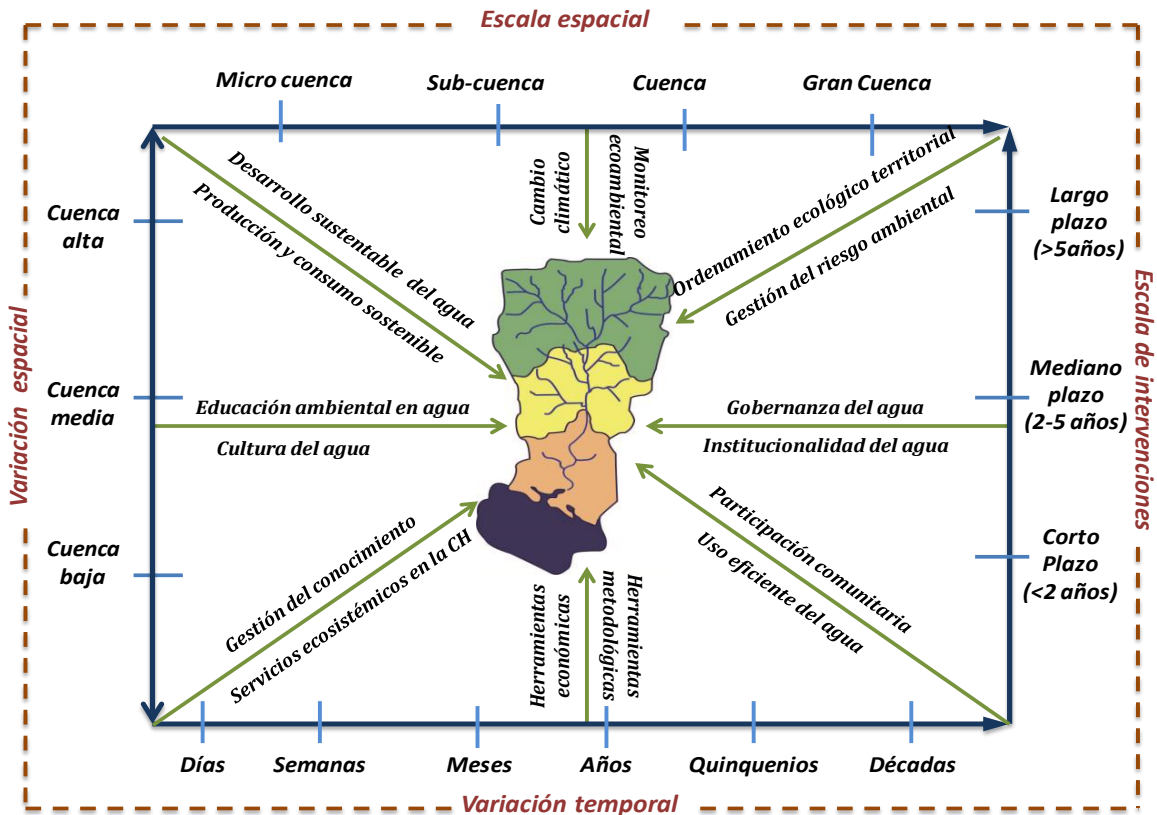


Figura 3.1 Modelo conceptual propuesto para la planeación de cuencas hidrográficas.

El MCP incluye cuatro ejes transversales: escala espacial, escala de intervenciones, variación espacial y variación temporal. La escala espacial de planeación recomendada es iniciar el proceso desde las microcuencas hasta llegar a las grandes cuencas hidrográficas. De igual forma, es necesario considerar la variación temporal asociada a cada uno de los procesos presentes en la CH y definir intervenciones considerando la variación espacial desde la cuenca alta, media y baja y la escala de tiempo de las intervenciones en corto, mediano y largo plazo.

3.4.1.1 *Desarrollo Sustentable (DS) para la gestión del agua*

El DS para la gestión del agua es la gestión del agua que debe permitir asegurar a largo plazo un equilibrio adecuado entre su uso económico, su función ambiental y su valor social, bajo una estrategia institucional, para proveer de agua suficiente y con calidad, a las generaciones actuales y futuras (Guaita y Jiménez, 2008; Philip, 2011). Entre las intervenciones para acercarse a la sustentabilidad ambiental en una CH se encuentran: estabilización poblacional, control demográfico, uso eficiente de recursos naturales, reducción de residuos y contaminación, conocimiento de límites ambientales, cambio en el modelo de desarrollo actual, educación y cambios sociales y culturales. De igual forma, deben integrarse la gestión del uso del territorio en el diseño de políticas públicas, compatibilizando el desarrollo del espacio con objetivos sociales, culturales, económicos y político-institucionales, con objetivos ambientales (Ovalles *et al.*, 2008).

En este sentido, se deben desarrollar políticas y estrategias que permitan una movilización social para garantizar el uso sustentable del agua para sus diversos usos, donde se integren sistémicamente el agua superficial, el agua subterránea, el agua lluvia, las aguas marinas costeras y la posibilidad de reúso de las aguas residuales. Así mismo, deben integrarse actividades permanentes en la gestión del agua tales como: reducir el uso, reutilizar, prevenir y controlar la sobreexplotación y la contaminación del suelo y el agua.

Otras intervenciones para el DS del agua son: modernización de regadíos, prevención de inundaciones, concesiones legales y controladas, evaluación del volumen de agua utilizada en riego, existencia de agua para ecosistemas y biodiversidad, estimular técnicas y tecnologías para aumentar la capacidad del suelo en retención de agua que asegure la infiltración de la precipitación y la disponibilidad de agua, establecer condiciones de vertimientos a las fuentes de agua, monitoreo ecoambiental permanente y evaluativo y aplicar y evaluar continuamente índices para evaluar calidad y cantidad de agua tales como: índice de explotación hídrica, índice de estrés hídrico e índice de consumo de agua para las fuentes superficiales y subterráneas, entre otros. De igual forma, generar acciones para eventos de sequías y adaptación a la variabilidad climática.

3.4.1.2 Producción limpia y consumo sostenible (PLCS) en la gestión del agua

La PLCS se orienta a cambiar patrones insostenibles de producción y consumo por los actores de una CH, con el fin de contribuir a reducir contaminación, conservar los recursos, favorecer la integridad ambiental de los bienes y servicios ecosistémicos y estimular el uso sostenible de los recursos naturales, entre ellos los recursos hídricos, los ecosistemas y la biodiversidad (MAVDT, 2010c). Generalmente, la PLCS está enfocada al sector productivo, pero este debe extenderse a las viviendas, fincas, parcelas, establecimientos públicos, comerciales e industriales, debe ser una cultura básica de aplicación por cada uno de los ciudadanos de una región y de un país.

Para una adecuada gestión del agua se debe implementar una política de PLCS por parte de los actores de una CH, que permita reducir la contaminación y conservar los recursos naturales en general y los recursos hídricos en particular. Entre las intervenciones para una gestión integrada del agua apoyada en los procesos de PLCS se encuentran: reducir generación de aguas residuales de carácter municipal, industrial y minero; elevar porcentajes de tratamiento y reúso de aguas residuales tratadas, reducir producción de residuos sólidos y peligrosos, modificar patrones de consumo de recursos hídricos, capacitar en el uso de técnicas de producción con enfoque de ciclo de vida del producto o servicio, implementándolo con énfasis en la producción agrícola y de alimentos.

De igual forma, la industria del turismo debe desarrollarse con un impacto mínimo sobre los recursos hídricos, el sector minero debe implementar el enfoque de ciclo de vida del producto con el fin de minimizar el gran impacto en los recursos hídricos, mejorar la infraestructura de agua potable, alcantarillado

y tratamiento de aguas residuales, integrado en un solo sistema y capacitar en este sistema, disminuir la presión de los acuíferos, mantener el ciclo hidrológico y los servicios ecosistémicos, promover la producción orgánica campesina, sensibilizar a la población en la adquisición de bienes y servicios desarrollados con enfoque de ciclo de vida y promover nuevos estilos de vida basados en la responsabilidad social y ambiental.

3.4.1.3 Educación ambiental (EA) en la gestión del agua

La educación ambiental (EA) es un proceso sistémico, continuo y complejo que parte del conocimiento reflexivo y crítico de la realidad biofísica, social, política, económica y cultural y permite a la población desarrollar y generar cambios en los conocimientos, valores, responsabilidad, aptitudes y comprender las relaciones de interdependencia con su entorno donde se puedan generar actitudes de valoración y respeto por el ambiente (CAM, 2003; Márquez, 2003; SINA, 2002).

La participación y educación comunitaria es fundamental para la gestión del agua (Caicedo, 2012). Las escuelas y colegios de las zonas rurales y urbanas juegan un papel importante promoviendo la gestión del agua como parte integral de las diversas actividades que se desarrollan en la CH. Así mismo, las universidades como máximo representantes de la discusión y desarrollo del pensamiento, deben desarrollar acciones que contribuyan a que los futuros profesionales, integren conocimientos técnicos y científicos, con aptitudes, valores, actitudes y acciones respecto a la protección de los recursos hídricos. De igual forma, la EA debe desarrollarse para la educación formal y no formal, así como promover la educación horizontal entre comunidades, desarrollar estrategias de aprendizaje en equipo entre instituciones y comunidades presentes en una CH, sistematizar, documentar y priorizar los procesos de EA desarrollados, con indicadores y lecciones aprendidas, así como criterios de sostenibilidad del sistema de EA, indicando recursos financieros y personal requerido.

La EA del agua debe orientarse por los siguientes objetivos (Márquez, 2003): conocer la dinámica espacial y temporal del agua, comprender que el agua se reparte de forma desigual, y por lo tanto hay lugares donde abunda y otros donde escasea, conocer los periodos en los que hay exceso y en los que se presenta sequía, analizar la diversidad y requerimientos del uso del agua, incentivar un mejor aprovechamiento del agua y su uso racional, educar para la protección de los acuíferos en su calidad y cantidad, y analizar las causas que provocan los principales problemas y proponer intervenciones, acometer éstas y valorar los resultados (Marcén, 2003).

3.1.4.4 Cultura del agua (CA)

La cultura del agua (CA) es el conjunto de costumbres, creencias, valores, actitudes, conductas, hábitos y estrategias individuales o comunitarias que se tienen para el uso del agua, que se presenta en las normas, formas organizativas, conocimientos, prácticas y objetos materiales que una comunidad se da o acepta tener; es el tipo de relación entre las organizaciones sociales que tienen el poder y los procesos

políticos que se concretan en relación con el aprovechamiento, uso y protección del agua. Diversas intervenciones pueden desarrollarse en torno a la CA (OMS, 2003), entre ellas están: promover la idea que el agua y la cultura son elementos indisolubles de la vida humana, favorecer el diálogo entre culturas a fin de encontrar soluciones a los problemas relacionados con el agua, propiciar una gobernanza integradora y dirigida a la búsqueda de soluciones que consideren la diversidad cultural, impulsar la expresión artística para potencializar la comprensión y el intercambio de información, fomentar la creación, circulación y divulgación de información sobre el agua y la cultura, conseguir que participen las escuelas, colegios y universidades en los procesos de divulgación de información relacionada con la cultura del agua, rescatar, documentar y difundir prácticas ancestrales con relación al manejo del agua e incentivar una CA que privilegie el ahorro y uso racional en el ámbito doméstico, industrial y agrícola (SEMARNAT, 2011).

3.4.1.5 *Gestión del conocimiento (GC) para la gestión del agua*

La GC es el proceso sistemático y organizacional para crear, adquirir, organizar, comunicar y utilizar conocimiento para la toma de decisiones eficientes y efectivas (Comas *et al.*, 2003; Jaime, 2008; Perrot, 2007; Wen, 2009). La GC es un concepto que cubre diversas disciplinas (Wang y Ariguzo, 2004): desarrollo de sistemas de información, manejo de información, sistemas de apoyo a la decisión, inteligencia artificial y manejo de recursos humanos. Diversas intervenciones se deben desarrollar para la GC en la toma de decisiones en la gestión integrada del agua: generar procesos sistémicos que permitan la recolección de datos, información y conocimiento, documentar y transferir conocimiento ancestral, indígena, local, científico, técnico y de expertos, generar estrategias para difusión de conocimiento, fomentar la sociedad del conocimiento, construir un marco político que construya, mantenga, extienda y comparta conocimiento. De igual forma, implementar una red de monitoreo hidrológico, meteorológico y ambiental, desarrollar sistemas de información que soporten en forma dinámica y actualizada la toma de decisiones, implementar herramientas ágiles y de fácil uso para la transferencia de conocimiento.

3.4.1.6 *Servicios ecosistémicos (SE) en una cuenca hidrográfica*

Un ecosistema es un sistema complejo, dinámico y abierto de comunidades de plantas, animales y microorganismos y el medio ambiente inorgánico, que interactúan como una unidad funcional. Los bienes y servicios ecosistémicos (BSE) son los beneficios que las personas y las poblaciones biológicas obtienen de los ecosistemas. Una gestión ambiental efectiva, orientada a la preservación de los ecosistemas y la generación de bienestar social, debe partir de la identificación, caracterización y valoración de los BSE, apoyar la generación de políticas de conservación basada en la mejora del conocimiento científico interdisciplinario sobre los socioecosistemas. Así mismo, otras intervenciones para proteger ecosistemas y BSE están: generar conocimiento de la resiliencia de los diversos ecosistemas, generar indicadores para estimar el estado de los BSE y difundir conocimiento sobre los ecosistemas y los BSE en la CH.

3.4.1.7 *Cambio climático (CC) y variabilidad climática en la gestión del agua*

El CC es la modificación del clima con respecto al historial climático a escala global o regional. Tales cambios se producen directa o indirectamente por la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos comparables de tiempo. Estos cambios se producen a diversas escalas de tiempo y sobre parámetros climáticos como: temperatura, precipitaciones y nubosidad. La variabilidad climática (VC) mide el rango en que los elementos climáticos, como temperatura o precipitación varían de un año a otro, esta es mayor a nivel regional o local que a nivel global.

Diversas intervenciones deben desarrollarse en 4 categorías para afrontar el CC y VC: estudios básicos, vulnerabilidad, adaptación y mitigación. En estudios básicos se tienen: monitoreo en variables hidro-climatológicas, como temperatura, precipitación, escurrimiento. Así mismo, desarrollo, implementación y adaptación de indicadores de CC, análisis de relación entre climatología y CC, modelación de procesos lluvia-escurrimiento, análisis de procesos costeros, estimación de emisiones de gases de invernadero (GEI) por diversas fuentes: aguas residuales y plantas de tratamiento, agricultura de riego, ganadería y revisión de obras hidráulicas bajo escenarios de CC.

En vulnerabilidad, las intervenciones recomendadas son: escalamiento de modelos, modelación de escurrimiento bajo escenarios de CC, modelación de balance hídrico bajo escenarios de CC, determinación de vulnerabilidad ante inundaciones y sequías, modelación de efectos de incremento del nivel del mar, efectos de calidad y eutrofización en cuerpos de agua bajo escenarios de CC, evaluación económica y social del CC, evaluación de cambios en uso de agua, evaluación del impacto y la magnitud de eventos meteorológicos severos e implementación de estaciones climáticas de vigilancia atmosférica global.

En adaptación, las intervenciones deben centrarse en: esquemas de ordenamiento hídrico en cuencas vulnerables, mapas de riesgo y obras fluviales de protección, esquemas de participación social, medidas contra la eutrofización y conservación de cauces y riberas. En mitigación: estimación de emisiones de GEI: aguas residuales y plantas de tratamiento, nuevos diseños en plantas de tratamiento, mercado de bonos de carbono y estimación de GEI por agricultura de riego y ganadería.

3.4.1.8 *Monitoreo eco-ambiental (MEA) en la planeación de CH*

El monitoreo eco-ambiental (MEA) corresponde al proceso que evalúa periódica y sistemáticamente, los diversos componentes de la CH, debe evaluar aspectos biofísicos, ambientales y socioeconómicos, así como evaluación, ejecución e implementación de leyes, normas y programas establecidos. En el MEA deben generarse indicadores que permitan evaluar el impacto de las intervenciones desarrolladas y el grado de degradación y recuperación de los ecosistemas y sus BSE asociados. El MEA permite contar con datos e información continua y de calidad de los niveles de contaminación ambiental en

una CH, que apoye la toma de decisiones informada y a las instituciones educativas y ambientales en la transmisión de conocimiento.

Entre las intervenciones que se requieren para generar un MEA se encuentran: incluir el proceso en la planeación de la CH, vincular a diversos actores de la CH, incluyendo estamentos educativos, integrar lo comunitario y lo científico, conformar redes institucionales para conceptualizar, desarrollar y sostener el proceso de MEA, trabajar interinstitucionalmente para no duplicar esfuerzos y garantizar una misma escala de información georeferenciada, institucionalizar el MEA en el tiempo y el espacio y generar procesos de sostenibilidad financiera e institucional.

Los procesos a evaluar dentro del MEA se encuentran: calidad y cantidad del agua, que incluya contaminación puntual y difusa, dinámica de ecosistemas, cambios estacionales, descarga de contaminantes, descarga de sedimentos, datos de plaguicidas, datos climatológicos, infraestructura de tratamiento de aguas, fenómenos de crecimiento y cambios poblacionales, técnicas agrícolas y de producción, explotación minera, manejo de residuos sólidos, usos del suelo, variabilidad climática, manejo de lodos, manejo de combustibles y sistemas de drenaje, entre otros.

3.4.1.9 Ordenamiento ecológico territorial (OET) en cuencas hidrográficas

El ordenamiento ecológico territorial (OET) es un proceso cuyo objeto es regular el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la conservación, protección, recuperación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de uso en una CH (CONANP, 2006).

Diversas intervenciones se deben desarrollar en el OET: integrarse a la planeación de la cuenca hidrográfica y a las diversas políticas y planes relacionados, el proceso debe ser dinámico, flexible, descentralizado y participativo, integrar el ordenamiento ecológico con el proceso de desarrollo regional-territorial, fortalecer los instrumentos normativos de planeación y uso del suelo, incorporar los actores locales, sistematizar e institucionalizar el proceso de evaluación, seguimiento y control de los instrumentos de planeación, utilizar sistemas de información geográfica y sistemas de apoyo a la decisión, desarrollar mecanismos para coordinación institucional, promover la realización de OET regionales y locales, generar reglas claras de ocupación y uso del territorio que reduzcan la incertidumbre en la toma de decisiones privadas y públicas, desarrollar criterios ecológicos que apoyen la regulación de actividades productivas y el manejo de los recursos naturales, establecer un contexto ecológico para la planeación del desarrollo urbano y rural e impulsar la integración entre planes y programas de desarrollo urbano y rural con el OET y la planeación de la CH.

3.4.1.10 *Gestión del riesgo ambiental (GRA) en la gestión del agua*

La gestión del riesgo ambiental (GRA) es la planificación con el fin de minimizar daños causados por fenómenos naturales y sus manifestaciones, adecuando las condiciones de infraestructura para reducir su vulnerabilidad o implementando planes que conduzcan a la mitigación del riesgo. Se deben desarrollar diversas actividades con relación a la GRA: identificación, previsión, intervenciones prospectivas y correctivas, manejo de desastres y protección financiera.

Entre las intervenciones para la GRA en la gestión del agua están : construir mapas de amenazas naturales con relación a la vulnerabilidad ante el CC, generar planes y medidas de contingencia, planes de desarrollo y proyectos de inversión, integrar políticas ambientales y coordinación institucional, generar una cultura de prevención de desastres, contar con información coherente para la categorización y la definición de políticas acorde con los niveles de riesgo real y relativo, elaborar términos de referencia para cada nivel de toma de decisiones, generar información disponible y factible de obtener considerando la escala geográfica y el nivel de resolución que permita la compatibilidad entre las etapas de evaluación previstas: amenazas, vulnerabilidad y riesgo, involucrar actores y potenciar recursos locales, generar y difundir conocimiento relacionados con el riesgo debido a eventos extremos hidrológicos, socialización de la prevención y mitigación y fortalecimiento institucional para la prevención y mitigación de desastres relacionados con el agua.

3.4.1.11 *Gobernanza del agua (GA)*

La gobernanza del agua (GA) existe donde las organizaciones encargadas de la gestión del agua establecen una política efectiva, junto con un marco legal apropiado para establecer y gestionar el agua de forma tal que responda a las necesidades sociales y económicas del Estado (Domínguez, 2009). Para alcanzar una GA se requieren los siguientes aspectos (Bustamente y Palacios, 2005): participación, transparencia, equidad, responsabilidad, coherencia, sensibilidad, integración y consideraciones éticas. En este sentido, los ciudadanos, mujeres y hombres, deben tener una voz, directamente o a través de organizaciones intermediarias que representes sus intereses, a lo largo de los procesos de formulación de políticas y toma de decisiones. La información debe fluir libremente dentro la sociedad. Los diferentes procesos y decisiones deben ser transparentes y abiertos al escrutinio público. Todos los grupos de la sociedad, mujeres y hombres deben tener la oportunidad de mejorar su bienestar. Las organizaciones del gobierno, el sector privado y la sociedad civil deben ser responsables ante el público de los intereses que representan. Para Domínguez (2009) se requieren: políticas efectivas de agua, marco legal adecuado y completo, marco institucional formal e informal, participación de los agentes sociales e información que fluye y rendición de cuentas.

3.4.1.12 *Institucionalidad para la gestión del agua*

En la gestión del agua, el arreglo institucional está compuesto por el conjunto de reglas formales e informales, y los incentivos que establecen quienes pueden participar en la toma de decisiones. La institucionalidad se puede medir a través de la densidad y diversidad de organizaciones sociales y su integración presente para la toma de decisiones sobre la gestión del agua, estas organizaciones pueden ser: de base, productores, comunales, municipales, organizaciones no gubernamentales (ONG), organizaciones gubernamentales (OG), cooperantes externos y organismos locales, nacionales e internacionales.

Entre las intervenciones para mejorar la institucionalidad en la gestión del agua, se encuentran: institucionalizar el proceso para la creación, gestión y funcionamiento del comité de la cuenca hidrográfica, identificando los actores, participantes y responsables, así como la estructura de organización y los costos operativos que garanticen la sostenibilidad financiera e institucional del comité de cuenca, promover la autogestión, la auto-organización y el autogobierno del comité de cuenca hidrográfica (PNUMA, 2001), legitimización de la institucionalidad informal, creación de fondos rurales comunitarios, formación de capital humano en la GIRH, fortalecimiento de mecanismos de participación comunitaria, creación de espacios de divulgación en temas de normas, veeduría y control social, reforma a los marcos legales que regule acción de agentes estatales, privados y comunitarios y conformación de una sociedad que lidere un escenario de discusión y debate frente a la GIRH a nivel de CH.

3.4.1.13 *Participación comunitaria (PC) para la gestión del agua*

La participación comunitaria (PC) es entendida como el proceso en el que las comunidades se reconocen como actores de su historia a nivel social, político, económico y cultural; con el derecho a intervenir de manera consciente en la toma de decisiones sobre los asuntos que los afectan. El empoderamiento de la comunidad consiste en la construcción y fortalecimiento de las organizaciones comunitarias y de sus redes sociales. Entre las intervenciones para lograr una PC en la gestión del agua se encuentran: concientizar a los diversos actores en la CH que la PC es un proceso continuo, complejo y de gran importancia en la GIRH, se debe gestionar la gestión de conflictos por el uso del recurso hídrico, con etapas graduales de cómo establecer y mediar un proceso de negociaciones con los diversos actores en la CH (Engel y Korf, 2006), promover la participación de las mujeres en la toma de decisiones para la planeación de CH (PNUMA, 2001), promover y fortalecer los comités de cuenca hidrográfica, identificar e integrar las organizaciones presentes en la CH, una primera opción será trabajar con las organizaciones bien consolidadas, o bien fortalecer las que están débiles, evitando crear competencias innecesarias e incentivar, convencer y demostrar a los actores, que hay razones para organizarse y que por este medio lograrán beneficios inmediatos y futuros (PNUMA, 2001).

3.4.1.14 *Uso eficiente del agua (UEA)*

El uso eficiente del agua (UEA) consiste en medidas para reducir la cantidad de agua que se utiliza en diversas actividades sociales y ambientales, que favorezcan el mejoramiento de la cantidad y calidad de agua (Aranda, 2007). El UEA es una estrategia de planificación del recurso hídrico a largo plazo, implica cambiar la manera tradicional de afrontar el incremento de la demanda, modificar prácticas y comportamientos del uso del agua (Sánchez y Sánchez, 2004).

Diferentes intervenciones se pueden desarrollar para implementar el UEA a nivel de hogares, industria, sector agrícola y ciudades (Arreguín, 1991). En los hogares: reducción de la demanda interior: uso de aparatos sanitarios y uso doméstico de bajo consumo, empleo de saneamiento seco o ecosaneamiento; no diluir lo que es concentrado, no poluir lo separado; no mezclar residuos humanos. Reducción de la demanda exterior: riego eficiente de jardines, manejo de piscinas y uso de plantas nativas, educación e implementación del ciclo del agua en los hogares para disminuir y reutilizar el agua residual, usar diferentes calidades de agua dependiendo del uso: limpieza, descargas del baño, uso externo, cocción de alimentos y aseo personal, usar aguas lluvias y aguas subterráneas, para diversos usos.

A nivel industrial las intervenciones deben ser: recirculación: sistemas de enfriamiento y lavado, reutilización: purificación de agua y segunda red para agua tratada para otros usos, reducción del consumo: optimización de procesos y optimización de uso de agua para zonas verdes, generar y difundir manuales para el uso óptimo del agua, dependiendo de cada sector industrial, incentivar y divulgar logros en consumos y contaminación del agua.

A nivel municipal las intervenciones deben estar encaminadas a la reducción del consumo y la contaminación: programas de educación escolar e institucional, programa de revisión y mantenimiento de implementos de los acueductos como: redes e infraestructura hidráulica y obra civil, programas de micromedidores y macromedidores y su mantenimiento, generar un programa de pérdidas de agua de los acueductos presentes en la cuenca hidrográfica, generar un sistema de base de datos e indicadores que permita evaluar el sistema de pérdidas de agua, desarrollo de programas de seguimiento continuo, programas de divulgación y motivación, las entidades ambientales deben controlar el caudal concesionado vs el caudal utilizado por empresas y diferentes actores, realizar y divulgar análisis de costo beneficio en la aplicación de prácticas de UEA.

En la agricultura se deben implementar diversas estrategias para el UEA: de campo: reducción de evapotranspiración, mejorar la infiltración a través de nivelación de tierras y compactación de surcos, administrativas: programación de riego según necesidades a través del monitoreo de la humedad y la precipitación, riego limitado favoreciendo cultivos de bajo consumo, de sistemas: reemplazo de regadera por tuberías, reducción de área regada y riego por goteo, sistema de indicadores de seguimiento y de reducción de costos, estrategias de capacitación, divulgación e implementación de acciones para la

reducción del consumo y la contaminación del agua, reutilizar efluentes en irrigación, lagunas para cultivo de peces, reutilizar el nitrógeno y fosforo, usar aguas lluvias y aguas subterráneas y promover e incentivar el uso de abonos orgánicos.

3.4.1.15 Herramientas económicas (HE) para la planeación de CH

Es importante distinguir entre valorar y cobrar el agua; el valor del agua permite una asignación racional del agua como recurso escaso utilizando el concepto de costo de oportunidad, así como contar con información para tomar decisiones considerando costos, beneficios actuales y futuros de las acciones que afectan el recurso hídrico (Granizo y Zuñiga, 2007), mientras cobrar por el uso del agua es un instrumento económico que afecta el comportamiento hacia la conservación y la eficiencia del uso del agua, para proveer los incentivos, gestión de la demanda y garantizar recuperación de costos (Sánchez y Sánchez, 2004). En este sentido, se deben desarrollar incentivos e instrumentos económicos que propicien la preservación de ríos, lagos, humedales, microcuencas, cuencas, acuíferos y zonas costeras (SEMARNAT, 2011). Entre los mecanismos para el cobro directo o indirecto por el agua se encuentran: pago por servicios ambientales (PSA) y ecosistémicos, bonos de agua, tarifas por el uso de agua potable y tasa retributiva, entre otros. Sin embargo, algunas críticas que se le hacen al PSA es la falta de información y comprensión sobre el funcionamiento de la naturaleza y los ecosistemas y el enfoque de asignarle un valor económico a los servicios ecosistémicos.

3.4.1.16 Herramientas metodológicas (HM) para la planeación de CH

En la PCH se deben emplear herramientas modernas, eficaces y confiables que contribuyan al análisis y toma de decisiones por parte de los actores locales y las instituciones responsables de la gestión de los recursos hídricos. Diversas herramientas metodológicas (HM) pueden utilizarse en la PCH entre ellas: métodos para el manejo y análisis de datos e información, metodologías de participación de actores, modelos de optimización y simulación y sistemas soporte a la decisión.

Los métodos para el manejo y análisis de información pueden ser: árbol de problemas, diagrama de causas y consecuencias, matriz de roles y responsabilidades, análisis de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas (DOFA), metodología fuerza-motriz-presión-estado-impacto-respuesta (FMPEIR), métodos multicriterio discretos y continuos, sistemas de información geográfico, técnicas de análisis de información por radar o remota y métodos estadísticos. Entre las metodologías de participación de actores están: cartografía social, investigación acción participativa, planificación participativa y gestión asociada, teoría de juegos, espacios de concertación, alianzas de aprendizaje en equipo, lecciones aprendidas y mapas de equidad y semáforo comunitario, entre otros.

De igual forma, existe una gama importante de modelos matemáticos, de optimización o simulación para el manejo de los recursos hídricos que guían la toma de decisiones y el entendimiento del sistema

cuenca hidrográfica (Debele *et al.*, 2006). Generalmente, estos modelos requieren bases de datos sólidas para ser calibrados y simular diversos escenarios de acción, así como personal capacitado para el análisis e interpretación de sus resultados. Otras herramientas para usar en la planeación de una CH son los sistemas soporte a la decisión (SSD o DSS, por sus siglas en inglés: Decision Support System). Un SSD es una combinación de modelos matemáticos o de conocimiento, que apoyan la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos.

El uso de una de estas herramientas o la combinación de ellas deben estar presentes en el proceso de planeación de una cuenca hidrográfica, con el fin de recomendar intervenciones y una toma de decisiones con criterios académicos, científicos, objetivos y confiables.

3.4.2 Estrategias para la planeación de una cuenca hidrográfica

La CH es un sistema complejo donde interactúan diversos subsistemas, para facilitar su planeación se deben considerar la variación espacial y temporal a través de diversas estrategias: escala de planeación espacial, escala de planeación temporal, variabilidad espacial y variabilidad temporal.

3.4.2.1 *Escala de planeación espacial: de la microcuenca a la gran cuenca*

Para algunos autores se debe iniciar la planeación de los recursos hídricos a través de la gran cuenca o la cuenca hidrográfica (IDEAM, 2007); sin embargo, otros autores recomiendan iniciar el proceso desde la microcuenca en un contexto de planeación hacia la gran cuenca, priorizando las microcuencas de montaña o andinas (CIAT, 2003; FAO, 2009; PNUMA, 2001). La microcuenca es la unidad básica de atención de proyectos económicos, de conservación de suelo y agua y de desarrollo comunitario (Dourojeanni, 2005); es un espacio útil para la planificación de los recursos hídricos pues en ella coinciden intercambios sociales, económicos productivos y ambientales.

Los estudios en microcuencas pueden ser más efectivos para evaluar temas específicos, comparar entre microcuencas y extrapolar sitios similares a lo largo de la cuenca. Se va creciendo en escala, a través del aprendizaje y recuperación ambiental de las zonas de menor tamaño, microcuencas, a zonas de mayor tamaño, las grandes cuencas hidrográficas (CIAT, 2003).

Otras ventajas para iniciar en microcuencas son (PNUMA, 2001): facilita la comprensión de las problemáticas y la implementación de intervenciones por la visibilidad y facilidad de acceso y por su representatividad en una región, el interés común de los actores es mucho más homogéneo que en una gran cuenca, el área de trabajo es más pequeña y por lo tanto la necesidad de recursos es menor, la administración es mucho más sencilla, el seguimiento ambiental y gerencial pueden ser más efectivos, la coordinación de los actores de la cuenca es más inmediata, la posibilidad de promover la organización para la comunidad puede facilitarse, se facilita la participación de los actores, las experiencias se comparten más rápidamente y la problemática social a enfrentar puede ser más homogénea, entre otros.

3.4.2.2 *Escala de planeación temporal: intervenciones de corto a largo plazo*

Planear y medir son elementos fundamentales para lograr resultados en una CH, pues permiten evaluar el desarrollo sustentable de los recursos hídricos. La visión de la gestión de proyectos en el manejo de cuencas hidrográficas se enfoca al desarrollo de diversas intervenciones en procesos, estructuras, políticas, leyes y normas para la sostenibilidad de los recursos naturales, cada uno de ellos con diversos tiempos de ejecución y de impacto en la CH. Aunque la urgencia de muchos problemas relacionados con el agua significa que se necesitan acciones eficaces a corto plazo, los enfoques de gestión del agua deben tener una visión de futuro para poder manejar contextos cambiantes.

Con el fin de apoyar un calendario y tareas a través del tiempo se pueden identificar intervenciones medibles para determinar si algunas prácticas u otras acciones están siendo implementadas y presentan un impacto positivo en la gestión de los recursos hídricos en la cuenca hidrográfica, por lo cual, es necesario generar intervenciones en diferentes escalas de tiempo para el proceso de planeación (EPA, 2008) : corto plazo (< 2 años), mediano plazo (2 a 5 años) y largo plazo (> 5 años).

3.4.2.3 *Variación espacial; de la cuenca alta a la cuenca baja*

Considerando los diversos procesos que se presentan en una cuenca hidrográfica: circulación, sinergia, intercambio y conflictos, tanto ambientales, socioeconómicos y culturales, que existen en la zona alta, media y baja (FAO, 2009), se deben analizar impactos y efectos globales entre las relaciones de las partes altas, medias y bajas, en ese orden (Faustino y Jiménez, 2000; PNUMA, 2005), pues entre los objetivos de planeación de una cuenca está el garantizar que los nexos entre las diversas partes estén equilibrados y sean sustentables (Arrojo *et al.*, 2007; FAO, 2009).

El manejo de los recursos de las partes altas tiene un efecto directo en los estándares de vida y en la producción de alimentos corriente abajo, lo que hace necesario integrar las diversas necesidades de los habitantes de las partes altas y bajas en el análisis, negociación de intercambios y toma de decisiones. La experiencia indica que el equilibrio entre las partes altas y bajas se consigue cuando las políticas logran amortiguar la desventaja socioeconómica que por lo general afecta a la población de las zonas altas, y las partes interesadas de las zonas bajas están dispuestas a pagar por los servicios ecoambientales de las partes altas y medias (FAO, 2009). Las poblaciones situadas en las partes altas deben realizar actividades que no degraden los bosques ni otros ecosistemas estratégicos, en este sentido podrían ser veedores ambientales con apoyo de otros actores e instituciones, de tal forma que perciban compensaciones por estas actividades.

3.4.2.4 *Variación temporal: de minutos a décadas*

La escala de planeación temporal para una CH debe ser considerada en tres procesos: en el proceso de monitoreo, cuando se usan modelos estadísticos o matemáticos de simulación y en el proceso de evaluación del impacto de las intervenciones en la CH. En estos tres procesos se requieren datos e

información con diversa escala temporal que puede ir desde minutos, horas, días, semanas, meses, años, quinquenios, décadas y hasta cientos de años.

En el proceso de monitoreo se deben considerar diversas escalas temporales y espaciales dependiendo de los parámetros y variables evaluados en cada subsistema de la CH. En términos generales, las variables asociadas a fenómenos sociales, económicos y culturales requerirán unos espacios temporales de años o décadas, mientras procesos biofísicos con dificultades en calidad y cantidad deben requerir evaluación con periodos de tiempo menores como días, semanas o meses, y en casos extremos de riesgos evaluaciones horarias o de minutos.

La evaluación del cambio climático y su efecto en los recursos hídricos requiere series temporales de datos centenarios o de milenios, con el fin de evaluar la variación y tendencia histórica y poder realizar estimaciones y pronósticos adecuados. En la modelación para el estudio de la calidad y cantidad de agua en una fuente superficial o subterránea, se requieren datos temporales diarios; mensuales o anuales. Para actividades de recreación o abastecimiento de agua se deben requerir datos diarios o semanales y si existen problemas de calidad de agua en las fuentes se requieren análisis horarios o de minutos, mientras procesos como cambios de uso del suelo o cobertura vegetal pueden ser modelados por periodos de 10 o más años.

3.4.3 El sistema de planeación de una cuenca hidrográfica

La planeación de una cuenca hidrográfica (PCH) es un proceso iterativo, holístico, geográficamente definido, integrado y cooperativo con el fin de caracterizar condiciones existentes, identificar y priorizar problemas, definir objetivos de manejo, desarrollar estrategias de protección o remediación e implementar y adaptar intervenciones seleccionadas (EPA, 2008). El objetivo de la PCH debe ser la de desarrollar un sistema social y ambiental sustentable que garantice la calidad de vida de los habitantes de la cuenca hidrográfica, mejorar la calidad y cantidad de agua para los diversos usos sociales y del medio ambiente. En el presente trabajo se define el proceso de PCH como un sistema que contiene tres subsistemas: organizativo, conocimiento, y monitoreo y evaluación, tal como se presenta en la Figura 3.2. Los 3 subsistemas deben estar articulados y conectados por medio de información y conocimiento. A continuación se describe cada subsistema.

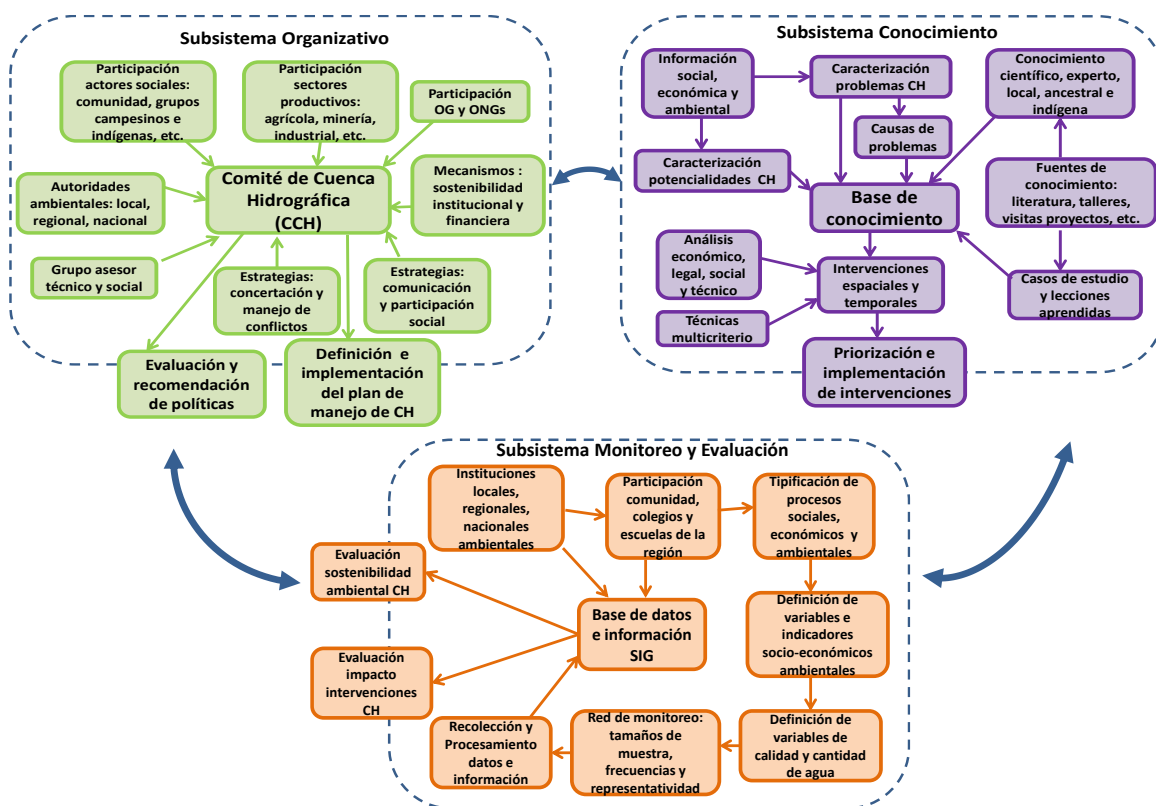


Figura 3.2 Esquema del proceso de PCH como un sistema basado en gestión de conocimiento.

3.4.3.1 Subsistema organizativo de planeación

Este subsistema tiene como objetivo la conformación del comité de la cuenca hidrográfica (CCH), que constituirá en un paso importante para contribuir a controlar efectivamente, eficientemente y de manera sostenible las acciones e intervenciones en la CH (Dourojeanni *et al.*, 2002). Los CCH deben permanecer en el tiempo y generar garantías de continuidad; deben anticipar y generar mecanismos de solución de conflictos y debe ser una unidad administrativa orientada a la gestión sostenible de la CH (PNUMA, 2001). Las principales funciones de los CCH son: promover la formulación de los planes maestros para el aprovechamiento racional de los recursos hídricos en el ámbito de su jurisdicción, supervisar las acciones en materia de aguas y manejo de cuencas, velar por un estricto cumplimiento de la normativa vigente en materia de aguas, en estrecha coordinación con la autoridad ambiental, coordinar con otras autoridades de cuencas adyacentes, formular y aprobar los planes de reforestación, conservación de suelos de las partes altas de la cuenca, defensas ribereñas y otras acciones inherentes a un manejo adecuado de las cuencas, resolver los conflictos en materia de agua y desarrollar acciones conducentes a un adecuado manejo de la CH (Dourojeanni *et al.*, 2002).

3.4.3.2 *Subsistema de conocimiento*

El subsistema de conocimiento tiene como objetivo generar conocimiento para la toma de decisiones de los recursos hídricos en la CH. El proceso de toma de decisiones en sistemas ambientales es una tarea compleja, debido a la gran cantidad de factores a ser considerados simultáneamente para obtener decisiones a ser implementadas (Gibert *et al.*, 2010). En este caso, es necesario identificar problemas y luego proponer intervenciones, considerando como meta superior la sustentabilidad ambiental y social de la CH.

El subsistema de conocimiento debe permitir definir las intervenciones a realizar en una CH, considerando la identificación de problemas, análisis integral de causas, efectos y posibles soluciones del problema y sus causas. En este subsistema se debe sistematizar el conocimiento tanto explícito como tácito, considerando diversos tipos y fuentes. Entre los tipos de conocimiento se encuentran: científico, experto, local, ancestral y de comunidades indígenas y raizales. Y las posibles fuentes: casos de estudio, entrevista a diversos actores, talleres, lecciones aprendidas, entre otras. En este subsistema deben implementarse las etapas que se distinguen en el proceso de GC: planear, crear, capturar, codificar, almacenar y transferir conocimiento.

3.4.3.3 *Subsistema de monitoreo y evaluación*

El subsistema de monitoreo y evaluación es un instrumento esencial para la PCH, es la definición e implementación de un plan de monitoreo el cual comprende el seguimiento sistemático, documentado, periódico y objetivo de la variación temporal y espacial de varios subsistemas dentro de la CH; es un proceso continuo y de largo plazo, que permite recolectar y analizar datos, información y conocimiento, para conocer el estado y evolución de actividades que tienen impacto en los recursos hídricos en una CH; apoya la toma de decisiones de manera informada y documentada.

El proceso de monitoreo debe realizarse de manera concertada entre los diversos actores y organizaciones que tienen injerencia en la CH. Se deben realizar alianzas con institutos de investigación científica de carácter nacional, regional o local y organizaciones para compartir datos e información y establecer un sistema de información y monitoreo (Andrade, 2007). El monitoreo debe responder a los siguientes interrogantes: ¿Qué datos deben recolectarse?, ¿con qué frecuencia?, ¿en cuántos lugares?, ¿mediante qué medios?, ¿Cómo almacenar, procesar y recuperar datos de manera flexible y eficaz? (Morán y Bianchi, 2005). De igual forma, debe evaluar el impacto de las intervenciones implementadas en la CH y proponer ajustes a las mismas.

1.12 3.5 **DISCUSIÓN**

Un nuevo modelo conceptual para la planeación (MCP) de cuencas hidrográficas ha sido definido en este capítulo. El MCP incluye 16 ejes fundamentales que deben ser considerados en el proceso de planeación de una CH, los cuales son: desarrollo sustentable para la gestión del agua, producción limpia y

consumo sostenible, educación ambiental, cultura del agua, gestión del conocimiento, servicios ecosistémicos, cambio climático, monitoreo ecoambiental, ordenamiento ecológico territorial, gestión del riesgo ambiental, gobernanza del agua, institucionalidad, participación comunitaria, uso eficiente del agua, herramientas metodológicas y herramientas económicas.

Este MCP complementa y fortalece los ejes definidos por otros autores como Phillips (2011), que destaca solamente los ejes de sociedad, ambiente, economía, espacio y tiempo, o Vishnudas *et al.* (2008), que define los ejes: recursos naturales, tecnología, instituciones y economía. De igual forma Jiménez (2005) define: creación de capacidades de gestión, participación concertada, extensión facilitadora, capacitación y educación, acción-investigación participativa, manejo adaptativo, sistematización de experiencias, aprovechar experiencias aprendidas, coordinación institucional y local, fortalecimiento de la capacidad local, ordenamiento territorial, promoción e incorporación de tecnologías limpias, mecanismos y alternativas financieras y sostenibilidad de las acciones.

En comparación con los diversos modelos conceptuales revisados para la PCH, el nuevo modelo propuesto en este capítulo introduce componentes actuales fundamentales y de gran relevancia en la planeación de cuencas hidrográficas como son: cambio climático, gestión de conocimiento, ordenamiento ecológico territorial, monitoreo eco-ambiental, gestión del riesgo ambiental, producción y consumo sostenible y desarrollo sustentable, entre otros.

El nuevo modelo conceptual evidencia la importancia de evaluar la variación espacial y temporal en la PCH, a través de considerar la cuenca alta, media y baja y tener una escala de intervenciones en el corto, mediano y largo plazo. De igual forma, enfatiza en iniciar el proceso de planeación por microcuencas hasta llegar a la gran cuenca. Adicionalmente, a través de la gestión de conocimiento se presenta en cada componente las intervenciones a implementar en la búsqueda de una CH sostenible. Esta definición de intervenciones no se encuentra en los modelos conceptuales revisados.

El proceso de planeación de una cuenca hidrográfica se definió en este capítulo como un sistema integrado por tres subsistemas: organizativo, conocimiento, y monitoreo y evaluación, contrario al esquema presentado por (IDEAM, 2004; IDEAM, 2008; IDEAM, 2010; MADS, 2013) donde el proceso de planeación tiene diferentes etapas planteadas de forma lineal y donde la gestión de conocimiento no forma parte integral del proceso, estas etapas son: aprestamiento, diagnóstico, prospectiva, formulación, ejecución, seguimiento y evaluación.

Un MC guía la toma de decisiones apoyando las respuestas al por qué y cómo de la planeación, permite unificar y organizar criterios y genera un sistema coordinado y coherente de conceptos y proposiciones para abordar el problema de la planeación del sistema cuenca hidrográfica. Es de interés académico y técnico, disponer de un modelo conceptual y metodológico que oriente la identificación, comprensión y evaluación de la toma de decisiones en la GIRH. La planeación de cuencas hidrográficas es

un proceso complejo que requiere un análisis sistémico, requiere generar intervenciones sostenibles y vincular los procesos de gestión de conocimiento para la toma de decisiones.

Este modelo conceptual puede ser aplicado a cualquier cuenca hidrográfica y puede ser fácilmente actualizado en la medida que se pueden adicionar, suprimir o cambiar ejes transversales y complementarse las intervenciones recomendadas. Adicionalmente, puede ser usado para el desarrollo de un sistema soporte a las decisiones que integre los diferentes componentes y utilice la gestión de conocimiento como apoyo fundamental en la toma de decisiones.

1.13 3.6 CONCLUSIONES

Un nuevo modelo conceptual para la planeación (MCP) de cuencas hidrográficas es presentado en este capítulo. El MPC presenta 16 ejes fundamentales que deben considerarse en la planeación de cuencas hidrográficas: desarrollo sustentable para la gestión del agua, producción limpia y consumo sostenible, educación ambiental, cultura del agua, gestión del conocimiento, servicios ecosistémicos, cambio climático, monitoreo ecoambiental, ordenamiento ecológico territorial, gestión del riesgo ambiental, gobernanza del agua, institucionalidad, participación comunitaria, uso eficiente del agua, herramientas metodológicas y herramientas económicas.

En cada uno de estos ejes se definen las principales intervenciones recomendadas para ser implementadas con el fin de conseguir una cuenca hidrográfica sostenible en el marco de la GIRH. El MCP definido incluye el análisis de la variación espacial y temporal en la PCH, a través de considerar la cuenca alta, media y baja y tener una escala de intervenciones en el corto, mediano y largo plazo. De igual forma, enfatiza en iniciar el proceso de planeación por microcuencas hasta llegar a la gran cuenca. El proceso de planeación de una cuenca hidrográfica se definió en este capítulo como un sistema integrado por tres subsistemas: organizativo, conocimiento, y monitoreo y evaluación.

El nuevo modelo conceptual presentado es una herramienta que contribuye al entendimiento del sistema cuenca hidrográfica e identifica los ejes fundamentales para la toma de decisiones en el proceso de planeación de una CH sostenible. Facilita la selección de intervenciones en la búsqueda la sustentabilidad de los recursos hídricos, provee una visión holística y define las etapas del proceso de planeación como un sistema, donde la gestión de conocimiento es fundamental para la toma de decisiones para la GIRH.

4. MODELO BASADO EN CONOCIMIENTO (MBC) PARA EL APOYO A LA PLANEACIÓN DE MICROCUENCAS ANDINAS

1.14 4.1 INTRODUCCIÓN

Un modelo basado en conocimiento (MBC) permite representar conocimiento de un área específica para el apoyo a la toma de decisiones en procesos de planeación, diagnóstico, enseñanza y control, entre otros. En este capítulo se desarrolla un MBC denominado *cuencandina*, para el apoyo a la planeación de microcuencas andinas. El modelo *cuencandina* se basa en el modelo conceptual presentado en el capítulo 3 que recomienda iniciar la planeación a nivel de microcuencas y prioriza la región andina, considerando que allí se presenta la mayor presión del recurso hídrico en Colombia. El modelo *cuencandina* se construyó a partir de seis índices definidos para cuatro subsistemas definidos en el capítulo 2 y consideró los principales problemas tipificados en ese capítulo. Los índices se construyeron combinando dos modelos analíticos: el modelo Presión-Estado-Respuesta (PER) y el modelo de lógica difusa de la inteligencia artificial (IA). A través del valor de los índices y el modelo conceptual presentado en el capítulo 3, se proponen intervenciones para implementar en una microcuenca andina, considerando la variación espacial: cuenca alta, media y baja y la variación temporal: corto, mediano y largo plazo.

1.15 4.2 REVISIÓN DE LITERATURA

4.2.1 Modelos basados en conocimiento (MBC)

Un modelo basado en conocimiento (MBC) tiene como objetivos capturar, modelar y sistematizar conocimiento en un formato reusable con el propósito de preservar, mejorar, sustituir, agregar, reaplicar y usar este para la toma de decisiones (Bjornson y Dingsoyr, 2008; Liao, 2005; Peña, 2006). Otros objetivos de un MBC son: proporcionar formación y aprendizaje, mejorar y acelerar la comunicación, incrementar la participación, reducir el tiempo para la resolución de problemas, disminuir el tiempo de propuestas, acelerar resultados y tener mayor eficacia global, disminuyendo costos (Becerra, 2000; Rodríguez, 2006).

Según Liao (2005), los MBC pueden modelar conocimiento a través de diversas estrategias metodológicas: sistemas basados en reglas, sistemas basados en conocimiento, redes neuronales, lógica difusa, metodología orientada a objetos, razonamiento basado en casos, desarrollo de sistemas de arquitectura, sistemas de agentes inteligentes, modelación, ontologías y metodologías de bases de datos. Se consideran MBC híbridos aquellos que utilizan en combinación más de una técnica de modelación del conocimiento. Según Chau (2007), existe una creciente demanda sobre la integración de MBC e IA para apoyar la toma de decisiones y para Gottschik (2006), uno de los grandes problemas de los MBC es el acceso a los diversos potenciales usuarios de este (Gottschalk, 2006).

4.2.2 Aplicación de modelos basados en conocimiento

Se han desarrollado diversas aplicaciones de un MBC con diferentes objetivos y en diferentes áreas de conocimiento, como se presentan a continuación: definir impactos de la cubierta forestal en los servicios ecosistémicos en sistemas de producción de café a pequeña escala (Cerdán *et al.*, 2012), optimizar generación de energía (Chee y Bañares-Alcántara, 2012), diseño y optimización de tanques de carga (Cui y Wang, 2013), diseño de plantas de generación de gas natural (da Silva *et al.*, 2014), interpretación de imágenes de teledetección (Forestier *et al.*, 2012), predicción de hábitat por distribución de especies (Fukuda *et al.*, 2013) y gestión del capital humano en empresas multinacionales (Gonzalez y Chakraborty, 2014), entre otros.

Entre las aplicaciones de los MBC asociados a los recursos hídricos se encuentran: modelo basado en reglas para el estudio de la erosión en una cuenca hidrográfica de ladera (Adinarayana *et al.*, 1999), MBC con lógica difusa para predecir macro-invertebrados en fuentes superficiales en Bélgica (Adriaenssens *et al.*, 2006), manejo de conocimiento para evaluar la sostenibilidad del reúso de agua gris (Al-Jayyousi, 2004), MBC para la toma de decisiones en sistemas de aguas residuales urbanos (Aulinas *et al.*, 2011), gestión del conocimiento para clasificar aguas costeras en Brasil (Carvalho y Favilla, 2009a), MBC para evaluar el riesgo de arsénico en pozos privados en Nueva Escocia (Chappells *et al.*, 2014), MBC para modelar calidad y cantidad de agua (Chau, 2007; Chau *et al.*, 2002), MBC para realizar pronósticos hidrológicos (Corzo y Solomatine, 2007b), MBC para proyectos de gestión del agua (Edelenbos *et al.*, 2011).

De igual forma, se tienen los siguientes estudios: MBC para el diseño de procesos para el tratamiento de aguas residuales (Garrido-Baseerba *et al.*, 2012), MBC para evaluar la dinámica en plantas de tratamiento de agua residual (Gibert *et al.*, 2010), MBC para apoyar el monitoreo de la salinidad del suelo en una cuenca hidrográfica (Giordano *et al.*, 2010), MBC para la gestión de aguas subterráneas (Hill *et al.*, 2013), MBC para la gestión de inundaciones en una cuenca hidrográfica (Kaewboonma *et al.*, 2013b), MBC para la evaluación de usos del suelo en las riveras de un río (Lee *et al.*, 2008b) y un MBC se desarrolló para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos (Zhu *et al.*, 2014), entre otros.

De lo anterior, se puede evidenciar el potencial de los MBC en diversos campos del conocimiento y su potencial como apoyo a las decisiones en aspectos relacionados con la gestión de los recursos hídricos. Sin embargo, no se encontró un estudio que permita el apoyo a la toma de decisiones en la planeación de cuencas hidrográficas en general y en particular para microcuencas.

4.2.3 Modelo presión-estado-respuesta (PER)

El modelo PER fue desarrollado por Frien y Rapport en 1979, es ampliamente utilizado a nivel mundial y fue promovido por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OECD, 1998). El objetivo del modelo PER es proveer una comprensión de un sistema a través de la definición de indicadores (Martins

et al., 2012), es una metodología útil basada en una continua interacción entre áreas, escalas y procesos, y provee las bases para desarrollos cualitativos y cuantitativos (Valenzuela y Matarán, 2008). Bajo el modelo PER, los problemas ambientales y las soluciones se simplifican en indicadores que relacionan procesos de causa y efecto entre las actividades humanas que ejercen presiones (P), el estado (E) del ambiente y la respuesta (R) de la sociedad a esta condición (Mangi *et al.*, 2007).

El modelo PER se ha utilizado en varios estudios ambientales: la OECD (1998), definió 14 indicadores PER, como un sistema de indicadores ambientales para evaluar el concepto de sostenibilidad. De igual manera, Semarnat (2012) definió indicadores PER para evaluar la sostenibilidad ambiental en la ciudad de México asociados a diversos temas: calidad del aire, agua, suelo, residuos, biodiversidad, recursos forestales y recursos pesqueros (Semarnat, 2012), similarmente, se definieron indicadores PER para el monitoreo de la biodiversidad en Costa Rica, evaluando cuatro clases de ecosistemas: bosque, costa marítima, sistema de agricultura y agua (Camacho-Sandoval y Duque, 2001). Similarmente, se desarrolló un índice para el manejo de la calidad y cantidad de agua en una cuenca hidrográfica a través de la metodología PER en un escenario de cambio climático (Kim y Chung, 2014).

Otros estudios generan estrategias para operar el modelo PER a través de la generación de índices, en este sentido se generó un índice para evaluar el nivel ambiental de Nueva Zelanda, considerando los componentes de aire, plantas, animales nativos y pesca marina (Hughey *et al.*, 2004), de igual forma, se evaluó la sostenibilidad de estrategias de manejo de bosques utilizando la metodología PER (Wolfslehner y Vacik, 2008). Similarmente, un indicador PER para evaluar el uso eficiente del agua fue elaborado a partir de considerar calidad del agua, disponibilidad de agua y pérdida de eficiencia (Manoliadis, 2002), indicadores ambientales fueron definidos para la evaluación espacial y planeación del agua en la costa de Granada España (Valenzuela y Matarán, 2008) y se definieron indicadores PER para evaluar y monitorear la erosión del suelo causada por el agua (Gobin *et al.*, 2004).

Pese a los estudios mencionados anteriormente, pocos índices e indicadores PER se han desarrollado para evaluar la sostenibilidad del agua de una cuenca hidrográfica, encontrándose el Watershed Sustainability Index (WSI) (Chaves y Alipaz, 2007; Firdaus *et al.*, 2014). El índice WSI tiene cuatro componentes: hidrología, ambiente, vida y política. En hidrología los indicadores son: variación de la disponibilidad de agua (P), variación de la demanda bioquímica de oxígeno DBO (P), disponibilidad de agua percapita (E), DBO en la cuenca (E), mejora en el uso eficiente del agua (R) y mejora en el tratamiento de aguas residuales (R). En ambiente define los siguientes: índice de presión ambiental en la cuenca (P), vegetación natural (E) y evolución de conservación en la cuenca (R). En el componente vida, define variación de ingresos (P), índice de desarrollo humano (IDH) (E), evolución del IDH (R) y en el componente de política define variación de educación (P), capacidad institucional (E) y evolución de presupuesto (R). De igual forma, se definió el índice Watershed Evaluation Index (WEI), a través de la conceptualización de

3 índices PER: potencial de daños por inundaciones, potencial de agotamiento de caudales y deterioro de la calidad de agua (Lee y Chung, 2007).

Estos índices revisados no contienen aspectos importantes en la planeación de una cuenca hidrográfica, como son degradación del suelo, conflictos por el uso del suelo y el agua, deforestación, erosión, gobernanza y cambio climático, entre otros. Así mismo, no tienen una herramienta computacional asociada para facilitar su uso y no genera recomendaciones de intervenciones a nivel espacial o temporal, que faciliten la toma de decisiones por diversos actores en la cuenca hidrográfica.

4.2.4 Modelo de lógica difusa

El modelo de lógica difusa (*fuzzylogic*) es una extensión de la lógica Booleana y utiliza conceptos de conjuntos de pertenencia similares a la forma del pensamiento humano, usa conjuntos difusos para tratar con datos e información imprecisa e incompleta, por lo tanto puede describir proposiciones vagas en un lenguaje natural (Chen *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2013; Phillis y Andriantiatsaholainaina, 2001) . El concepto de conjunto difuso fue introducido por Zadeh (1965) en la Universidad de Berkeley (California) como una generalización de un subconjunto exacto tradicional (Zadeh, 1965). La lógica difusa es útil para modelar sistemas complejos e imprecisos (Chau, 2006), es usada en problemas altamente no lineales en los cuales no existe un modelo matemático preciso para modelar el problema, puede modelar redundancia y conocimiento en el análisis de los resultados (Islam *et al.*, 2013), las reglas se pueden basar en conocimiento heurístico (López *et al.*, 2008; Miah *et al.*, 2008), puede representar aspectos cualitativos del conocimiento y el proceso de inferencia humano, sin un análisis cuantitativo preciso. Por lo tanto, son menos precisos que modelos determinísticos o numéricos convencionales, sin embargo, las ganancias en simplicidad, velocidad computacional y flexibilidad que resultan de su aplicación compensan una eventual pérdida de precisión (Lermontov *et al.*, 2009).

Diversos estudios asociados con la gestión de los recursos hídricos han utilizado lógica difusa, es el caso del estudio de Ocampo-Duque *et al.* (2013), que generó un índice de calidad de agua aplicado al río Cauca, considerando los parámetros: oxígeno disuelto, coliformes fecales, DBO, temperatura, fosfatos, turbiedad y sólidos totales (Ocampo-Duque *et al.*, 2013). De igual forma, González (2012) generó un índice de calidad de agua basado en lógica difusa, aplicado a la cuenca hidrográfica del río Aburrá, usando los parámetros temperatura, pH, oxígeno disuelto, DBO y macro-invertebrados, entre otros (González *et al.*, 2012). Chen y Chang (2010) desarrollaron un análisis usando operadores fuzzy para apoyar la toma de decisiones de los recursos hídricos considerando: abastecimiento de agua, demanda de agua y análisis de costo beneficio (Chen y Chang, 2010).

De igual forma, Kim *et al.* (2013) utilizaron lógica difusa para definir el mejor sitio para ubicar una planta de aguas residuales en una cuenca hidrográfica (Kim *et al.*, 2013), por su parte Chen *et al.* (2011)

desarrolló una metodología para la planeación de alternativas en una CH, considerando los parámetros: control de erosión, restauración ecológica, construcción ambiental y conservación ambiental (Chen *et al.*, 2011). Mientras, Li (2010) generó un estudio para el manejo de los recursos hídricos usando un intervalo estocástico fuzzy, considerando variables como: demanda de agua, evaporación, capacidad de almacenamiento de reservorios y costos (Li *et al.*, 2010). De igual forma, Reshmidevi *et al.* (2009) generaron un sistema de inferencia fuzzy con sistemas de información geográfica para evaluar la sostenibilidad del suelo en cuencas hidrográficas agrícolas (Reshmidevi *et al.*, 2009).

Sin embargo, pocos estudios han integrado modelos basados en conocimiento, modelos PER y lógica difusa, para problemas ambientales y no se encontró ninguno de ellos para la planeación de cuencas hidrográficas. El modelo SAFE (Sustainability Assessment by Fuzzy Evaluation), integra el modelo PER y el modelo de lógica difusa, y fue creado para medir la sostenibilidad de una ciudad (Phillis y Andriantiatsaholainaina, 2001; Phillis *et al.*, 2011). Este modelo genera mecanismos para medir el desarrollo sostenible, considerando un índice ecológico y un índice humano, el cual genera una medida global de sostenibilidad de una localidad, una población o una ciudad. De igual forma, se generó un sistema de indicadores para evaluar el grado de salud ambiental en un humedal, considerando el modelo PER y lógica difusa (Zhiyi y Yixin, 2010). Un sistema de índices fue generado para la evaluación de seguridad ecológica del suelo, considerando PER y lógica difusa (Zhao y Tao, 2010).

De los estudios revisados ninguno integra modelos basados en conocimiento, lógica difusa y el modelo PER, no utilizan gestión de conocimiento para apoyar la toma de decisiones en la medida que no generan intervenciones de acuerdo con los valores de los índices. De igual forma, ninguno genera un sistema de índices para el apoyo a la planeación de cuencas hidrográficas en general y en particular en microcuencas andinas. Así mismo, la mayoría de indicadores e índices, no son fáciles de operar pues no tienen una herramienta computacional asociada. En ninguno de estos estudios se generaron estrategias operativas para la evaluación de estos indicadores ni los integraron para la toma de decisiones.

1.16 4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se construyó un modelo basado en conocimiento (MBC) denominado *cuencandina*. El MBC es híbrido considerando que se construyó utilizando como marco analítico la integración del modelo presión-estado-respuesta (PER), lógica difusa y sistemas basado en conocimiento del área de la inteligencia artificial. Se definieron indicadores PER, cualitativos y cuantitativos, a través de la tipificación de los principales problemas en una cuenca hidrográfica en Colombia, definidos en el capítulo 2 y resumidos en la Tabla 4.1. Por su importancia estratégica en la planeación de cuencas hidrográficas, los problemas subrayados fueron considerados y clasificados en indicadores de presión, estado y respuesta, considerando el esquema de la Figura 4.1.

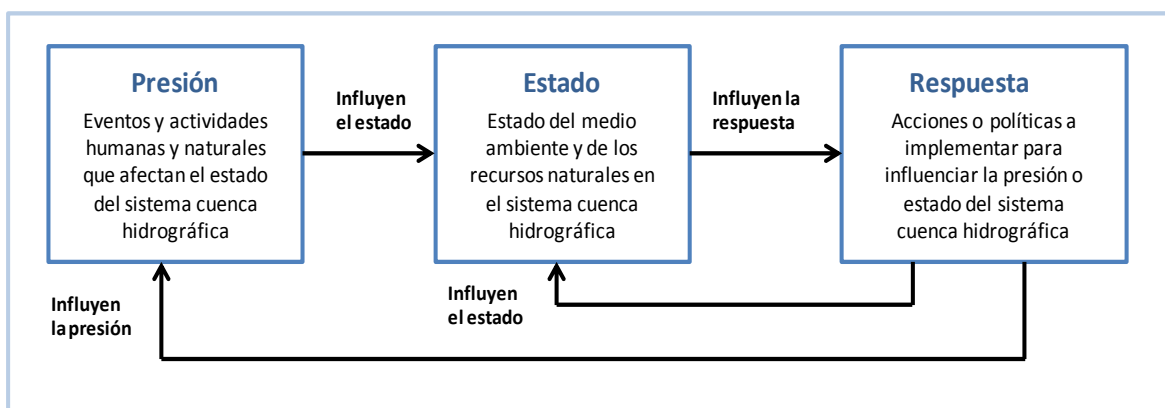


Figura 4.1 Modelo Presión, Estado, Respuesta (PER) para el modelo *cuencandina*.

Los indicadores PER, cualitativos y cuantitativos, se clasificaron en los cuatro subsistemas definidos en el capítulo 2: subsistema bio-físico, socio-económico, político-institucional y tecnológico. En cada subsistema se definieron temas estratégicos, de tal forma que agruparan los principales problemas tipificados en una cuenca hidrográfica, considerando las causas (presión), el estado actual de la problemática ambiental (estado) y las estrategias y políticas implementadas para la solución y mitigación del problema (respuesta).

A partir de lo anterior, se definieron seis índices que permiten evaluar la sostenibilidad de una microcuenca andina, cada índice está asociado a un tema estratégico para la PCH. En el subsistema bio-físico se definieron 3 temas estratégicos y 3 índices asociados: tema 1: calidad de agua; índice 1: índice de calidad de agua superficial (**ICASup**), tema 2: degradación del suelo; índice 2: índice de degradación del suelo (**IDS**) y tema 3: cambio climático; índice 3: índice de cambio climático (**ICC**). En el subsistema socio-económico se definió un tema y un índice asociado: tema: educación y cultural del agua, índice: índice de educación y cultural del agua (**IEDCA**).

En el subsistema político-institucional se definió un tema y un índice: tema: gobernanza del agua e índice: índice de gobernanza del agua (**IGBA**) y en el subsistema tecnológico, se definió un tema y un índice; tema: conocimiento e información e índice: índice de datos, información y conocimiento (**IDIC**).

Con el fin de generar una operatividad en los seis índices, se definió y aplicó conjunto difusos para la toma de decisiones. La estructura del modelo de lógica difusa utilizado se presenta en la Figura 4.2. El proceso consistió en definir funciones de pertenencia (FP) para cada uno de los indicadores PER definidos. Por su simplicidad y precisión se escogieron FP trapezoidal, triangular y singleton.

Tabla 4. 1 Resumen de los principales problemas en una cuenca hidrográfica en Colombia.

No.	Subsistema	Principales problemas	Ponderación (%)	Sub-total subsistema (%)
1	Biofísico – aire	Contaminación atmosférica general	26,7	63,5
		Quemas e incendios forestales	13,8	
		<u>Emisión de Gases Efecto Invernadero (GEI)</u>	11,7	
		<u>Contaminación por industrias</u>	11,3	
2	Biofísico – suelo	<u>Erosión</u>	16,8	50,8
		<u>Contaminación y degradación del suelo</u>	13,7	
		<u>Conflictos de usos del suelo</u>	11,2	
		<u>Deforestación</u>	9,1	
3	Biofísico – agua	<u>Contaminación general del agua</u>	20,0	53,6
		<u>Manejo y vertimiento de aguas residuales</u>	12,1	
		<u>Uso ineficiente del agua</u>	11,2	
		Sequías y escases del agua	10,3	
4	Biodiversidad y ecosistemas	Pérdida de biodiversidad	24,9	76,4
		<u>Deforestación y fragmentación de bosques</u>	24,9	
		<u>Pérdida de ecosistemas estratégicos</u>	13,3	
		<u>Falta conocimiento e investigación</u>	13,3	
5	Social	<u>Conflictos por usos del suelo y el agua</u>	19,7	58,7
		<u>Falta educación, cultura y conciencia ambiental</u>	15,5	
		<u>Débil participación comunitaria</u>	14,2	
		Pobreza y NBI	9,4	
6	Político	Corrupción	18,9	60,8
		Falta de articulación y generación de política ambiental	16,2	
		<u>Deficiente gestión de los recursos hídricos</u>	14,0	
		<u>Débil Gobernanza</u>	11,7	
7	Económico	<u>Bajos recursos para planes de la CH</u>	25,6	70,9
		Sobreexplotación y conflictos del uso de BSA	19,8	
		Bajos ingresos de la comunidad	13,2	
		Modelo desarrollo económico	12,3	
8	Cultural	<u>Falta cultura ambiental y cultura del agua</u>	22,3	61,4
		<u>Desconocimiento problemática ambiental</u>	15,8	
		<u>Débil participación comunitaria</u>	11,9	
		<u>Inadecuadas prácticas ambientales</u>	11,4	
9	Legal	Incumplimiento de leyes y normas	26,3	77,6
		Normatividad contradictoria y desarticulada	25,4	
		Desconocimiento de leyes y normas	13,4	
		<u>Conflictos usos del suelo y el agua</u>	12,5	
10	Tecnológicos	<u>Baja transferencia de tecnología</u>	20,8	67,4
		<u>Falta acceso a tecnologías de punta</u>	19,5	
		<u>Falta recursos e investigación</u>	14,8	
		<u>Uso inadecuado de tecnología</u>	12,3	
11	Institucional	<u>Descoordinación institucional</u>	29,8	74,0
		<u>Débil gestión institucional para la planeación de CH</u>	19,0	
		<u>Escasa presencia institucional</u>	13,6	
		<u>Débil gobernanza institucional</u>	11,6	
12	Productivo	<u>Inadecuadas prácticas agrícolas</u>	27,3	69,9
		<u>Contaminación y uso de suelos y aguas</u>	15,3	
		Producción insostenible	14,4	
		<u>Conflictos usos del suelo</u>	12,9	
13	Conocimiento e información	<u>Falta información ambiental</u>	26,8	77,9
		<u>Débil proceso de divulgación y comunicación</u>	23,2	
		<u>Falta conocimiento del estado de los RN</u>	17,3	
		<u>Falta educación y cultura ambiental</u>	10,6	

La base de conocimiento contiene el conocimiento asociado a la aplicación y objetivos del sistema, que permiten definir reglas lingüísticas que realizarán la toma de decisiones. El proceso de inferencia relaciona los conjuntos difusos de entrada y salida para representar las reglas que definen el sistema, utiliza la información de la base de conocimiento y las FP. La defusificación realiza el proceso de estimar los valores difusos para la toma de decisiones, utilizando métodos matemáticos como: método del centroide, método del promedio ponderado y método de membrecía del medio del máximo, entre otros. El método utilizado en esta investigación fue defusificación por el método del centroide.

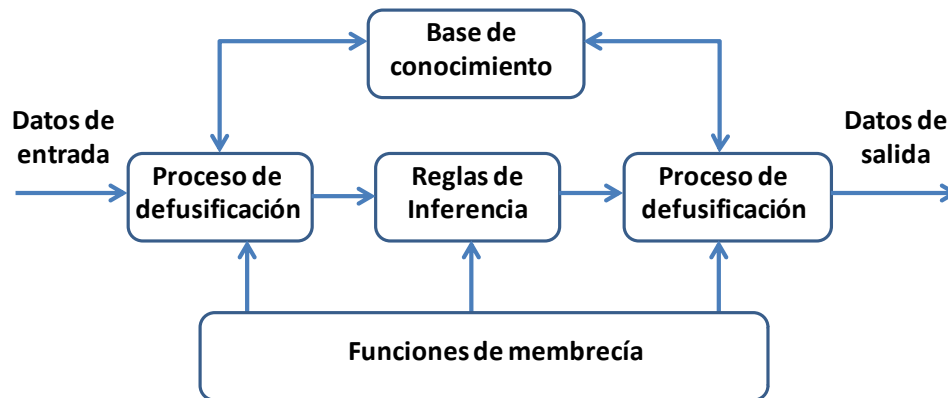


Figura 4.2 Estructura conceptual de un modelo de lógica difusa.

La combinación de las FP de los indicadores de presión (P) genera un valor del índice de presión con valores cualitativos de fuerte, moderado o débil. Esta combinación se desarrolla a través de la definición reglas de decisión de la forma SI...ENTONCES (IF... THEN ELSE). De igual forma, la combinación de las FP de los indicadores de estado (E) genera un valor del índice de estado con valores cualitativos de malo, regular o bueno y la combinación de las FP de pertenencia de los indicadores de respuesta (R) genera un valor del índice de respuesta con valores cualitativos de malo, regular o bueno. Una vez se tienen los valores cualitativos de cada índice PER, se combinan estos a través de FP y reglas de decisión, para generar el valor del índice asociado a cada subsistema, generando valores de malo, regular o bueno.

A partir de la combinación de los indicadores PER, las funciones de lógica difusa y la gestión de conocimiento se define el modelo basado en conocimiento denominado *cuencandina*, cuyo esquema operativo se presenta en la Figura 4.3. Las entradas del modelo consisten en el valor de los indicadores diferenciando estos en la cuenca alta, media y baja. Las salidas del modelo son el valor de los seis índices en cada zona de la cuenca: alta, media y baja y las intervenciones recomendadas para ser implementadas en el corto (< 2 años), mediano (2-5 años) y largo plazo (> 5 años).

Tanto la definición de los problemas de una CH, indicadores PER, FP de lógica difusa e intervenciones para la sostenibilidad de una CH se generaron a través de la gestión de conocimiento. La adquisición de conocimiento se capturó de diversas fuentes, que incluyeron: entrevistas directas con

científicos, expertos de diversas áreas de conocimiento, entrevistas a diversos actores de las cuencas hidrográficas, revisión de artículos, informes técnicos, guías de planeación ambiental y planes de ordenamiento de cuencas hidrográficas (POMCAs).

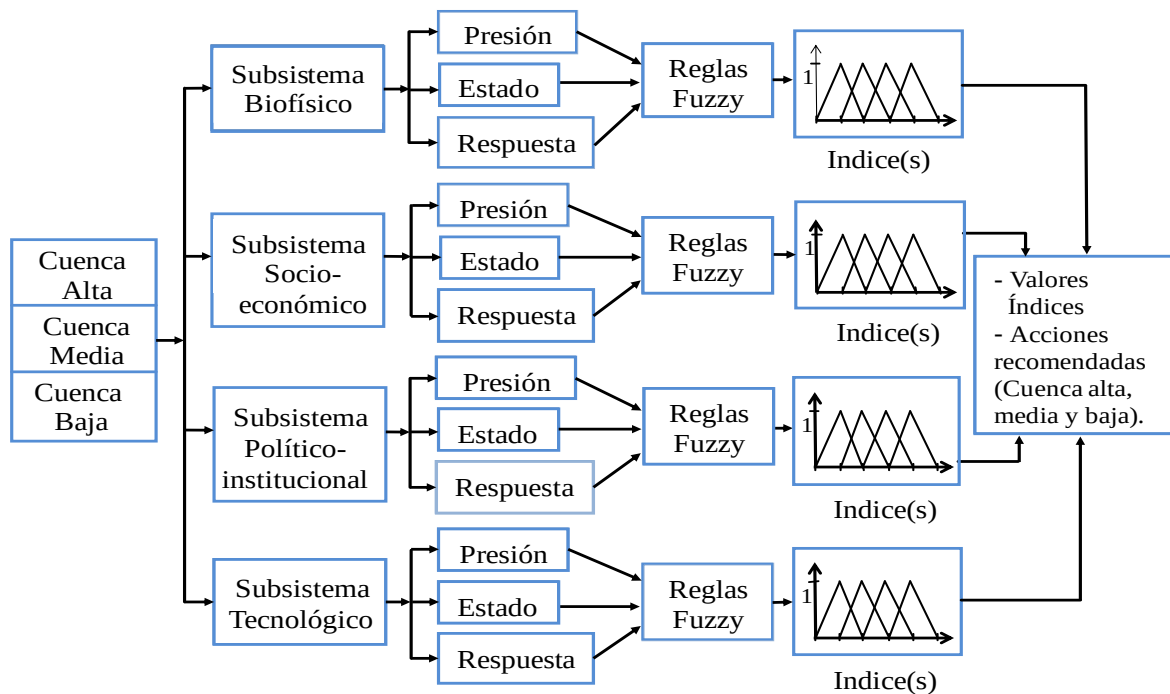


Figura 4.3 Esquema metodológico del modelo *cuencandina*.

1.17 4.4 RESULTADOS

4.4.1 Definición de indicadores presión-estado-respuesta (PER)

Los indicadores de estado (E) miden las características existentes en la microcuenca andina, los de presión (P), permiten cuantificar la intensidad de la intervención humana o natural sobre la microcuenca y los de respuesta (R), permiten cuantificar las acciones sociales de corrección de la presión o de estado en la microcuenca. La conjugación de estos indicadores muestra el resultado del nivel de desempeño de sostenibilidad ambiental de la microcuenca que se visualiza a través de seis índices.

Para el subsistema bio-físico se definieron tres temas de análisis: calidad de agua, degradación del suelo y cambio climático. En cada uno de estos temas se identificaron indicadores PER y se definió un índice cualitativo asociado a la sostenibilidad ambiental de una microcuenca andina. Como se resumen en la Tabla 4.2. Los índices en este subsistema son: **ICA^{sup}**: índice cualitativo PER de calidad de agua superficial, **IDS**: índice cualitativo PER de degradación del suelo e **ICC**: índice cualitativo PER de cambio climático.

Tabla 4. 2 Indicadores de PER definidos para el subsistema biofísico.

Índice	TEMA	Presión (P)		Estado (E)		Respuesta (R)	
		Indicadores	Sigla	Indicadores	Sigla	Indicadores	Sigla
ICAsup	Calidad de agua	Descarga de aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento	AR	Contaminación del agua superficial (DQO mg/l)	DQO	Aguas residuales tratadas	ART
		Existencia de minería	M	Contaminación microbiológica (UFC/100ml)	COF	Estrategias de minería sostenible	EMS
		Nivel de erosión	NE		E	Políticas de reforestación y revegetación	PRR
IDS	Degradación del suelo	Ganadería intensiva	GI	Nivel de erosión	NE	Políticas de reforestación y revegetación	PRR
		Uso de fertilizantes y plaguicidas	UFP	Nivel de contaminación del suelo	NCS	Prácticas de conservación de suelo	PCS
		Manejo de residuos sólidos	MRS			Implementación de PGIRs	PGIRs
ICC	Cambio climático	Emisiones de Bióxido de carbono	ICO ₂	Variación de la precipitación	VPA	Medidas de mitigación y adaptación al cambio climático	MA CC
				Variación de la temperatura	VTA		
				Ocurrencia de eventos naturales extremos (Sequías, inundaciones, deslizamientos, etc.)	IEN	Inversión en el abatimiento y control de la contaminación del aire	IMA

El índice **ICAsup** tiene como indicadores de P: descarga de aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento, existencia de minería y nivel de erosión del suelo, los indicadores de E son: nivel de contaminación del agua en dos parámetros: demanda química de oxígeno (DQO) y nivel de coliformes fecales en las fuentes superficiales, y los indicadores de R son: nivel de aguas residuales tratadas, estrategias implementadas de minería sostenible y políticas de reforestación y revegetación.

El índice **IDS** tiene como indicadores de P: nivel de ganadería intensiva, uso de fertilizantes y plaguicidas y manejo de residuos sólidos, los indicadores de E son: nivel de erosión y nivel de contaminación del suelo y los indicadores de R: políticas de reforestación y revegetación, prácticas de conservación del suelo e implementación de programas de gestión integral de residuos sólidos. El índice cualitativo de cambio climático **ICC** tiene como indicador de P: emisiones de bióxido de carbono, como indicadores de E: variación de la precipitación, variación de la temperatura y ocurrencia de eventos naturales extremos, tales como: sequías, inundaciones y remoción en masa, entre otros. Los indicadores de R son: medidas de mitigación y adaptación al cambio climático e inversión en el abatimiento y control de

la contaminación del aire. Es decir, el subsistema biofísico en una microcuenca andina es caracterizado por 3 índices, compuestos de 7 indicadores de presión, 7 indicadores de estado y 8 indicadores de respuesta, para un total de 22 indicadores PER.

En el subsistema socio-económico se definió un índice PER denominado: educación y cultural del agua, denominado **IEDCA**: índice cualitativo de Presión, Estado, Respuesta (PER) de educación y cultura del agua. El índice **IEDCA** tiene como indicadores de P: actores interesados en educación y cultura del agua y prácticas inadecuadas del uso del agua. Los indicadores de E son: participación de la sociedad civil en proyectos de educación y cultura del agua y capacitación en el uso eficiente del agua y los indicadores de R son: programas de educación y cultura del agua y recursos destinados para educación y cultura del agua, tal como se describe en la Tabla 4.3. El índice **IEDCA**, consta de 2 indicadores de presión, 2 de estado y 2 de respuesta, para un total de 6 indicadores PER.

Tabla 4. 3 Indicadores de PER definidos para el subsistema socio-económico.

Índice	TEMA	Presión (P)		Estado (E)		Respuesta (R)	
		Indicadores	Sigla	Indicadores	Sigla	Indicadores	Sigla
IEDCA	Educación y cultura del agua	Actores interesados en educación y cultura del agua	AEA	Participación de la sociedad civil en proyectos de educación y cultura del agua	PEA	Programas de educación y cultura del agua	PCEA
		Prácticas inadecuadas del uso del agua	PIA	Capacitación en uso eficiente del agua	CUEA	Recursos para educación y cultura del agua	REA

En el subsistema político-institucional, se define el índice **IGBA**: índice cualitativo PER de gobernanza del agua. El índice **IGBA** considera como indicadores de P: nivel de conflictos por el uso del agua, nivel de conflictos por el uso del suelo y tasa de crecimiento poblacional. Los indicadores de E son: grado de participación comunitaria y de diversos actores y nivel de coordinación institucional y los indicadores de R son: estrategias de comunicación y participación social y consejo de cuenca funcionando con sistema administrativo propio, tal como se presenta en la Tabla 4.4. El índice **IGBA**, consta de 3 indicadores de presión, 2 de estado y 2 de respuesta, para un total de 7 indicadores PER.

Tabla 4. 4 Indicadores PER definidos para el subsistema político-institucional.

Índice	TEMA	Presión (P)		Estado (E)		Respuesta (R)	
		Indicadores	Sigla	Indicadores	Sigla	Indicadores	Sigla
IGBA	Gobernanza del agua	Conflictos por el uso del agua	CUA	Grado de participación comunitaria y de diversos actores	GPC	Estrategias de comunicación y participación social	CPS
		Conflictos por el uso del suelo	CUS				
		Crecimiento poblacional	TCP	Nivel de coordinación institucional	CI	Consejo de cuenca funcionando con sistema administrativo propio	CCH

En el subsistema tecnológico, se definió el índice **IDIC**: índice cualitativo PER de información y conocimiento. El **IDIC** tiene como indicadores de P: niveles de requerimientos de datos e información ambiental y transferencia de información y conocimiento. Como indicadores de E: disponibilidad de datos, información y conocimiento de la cuenca hidrográfica y conocimiento sistematizado de la cuenca hidrográfica y como indicadores de R: existencia de planes de monitoreo y recursos para su ejecución y niveles de investigación y transferencia de conocimiento en la cuenca hidrográfica, como se presenta en la Tabla 4.5. El índice **IDIC**, consta de 2 indicadores de presión, 2 de estado y 2 de respuesta, para un total de 6 indicadores PER.

4.4.2 Definición de funciones de pertenencia de la lógica difusa

A cada indicador PER definido para evaluar la sostenibilidad de una microcuenca andina se le definió una función de pertenencia (FP) de la lógica difusa. Una FP es una función que asocia a cada elemento de un conjunto difuso el grado con que pertenece al valor lingüístico asociado. Se recomiendan formas sencillas para facilitar los procesos de fusificación y defusificación. Las funciones definidas se aplican a cada una de las zonas: alta, media y baja.

Para el índice **ICASup** se generaron las funciones de pertenencia triangular, trapezoidal y singleton asociados a cada uno de los indicadores PER. Por ejemplo, para el indicador AR (descarga de aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento) se definió una función trapezoidal con valores bajos para AR menores a 30%, valores medios entre 20 y 70% y valores altos entre 60 y 100%. Para el indicador M (existencia de minería) se definió la función singleton, con valores de si = 0 y no =1. El indicador NE (nivel de erosión) se definió a través de la función trapezoidal con valores de bajo para niveles menores a 30%, niveles medios entre 20 y 60% y niveles altos para valores mayores a 40%. Similarmente, se definieron las funciones para los indicadores de estado y para los indicadores de respuesta, tal como se presentan en la

Figura 4.4. Las funciones de pertenencia definidas para los indicadores **IDS**, **ICC**, **IGBA**, **IEDCA** e **IDIC**, se presentan en los Anexos 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5, respectivamente.

Tabla 4. 5 Indicadores de PER definidos para el subsistema tecnológico.

Índice	TEMA	Presión		Estado		Respuesta	
		Indicadores	Sigla	Indicadores	Sigla	Indicadores	Sigla
IDIC	Conoci- miento e informa- ción	Requerimientos de datos e información ambiental	RDA	Disponibilidad de datos, información y conocimiento de la CH	DDI	Existencia de planes de monitoreo y recursos para su ejecución	RPM
		Transferencia de información y conocimiento	TIC	Conocimiento sistematizado de la CH	CSCH	Investigación y transferencia de conocimiento en la CH	ITC

4.4.3 Definición de reglas de decisión

Considerando los valores de los indicadores PER, la metodología de lógica difusa y una base de conocimiento heurística, se generaron las reglas de decisión para dar valor a cada uno de los seis índices definidos: **ICASup**, **IDS**, **ICC**, **IGBA**, **IEDCA** e **IDIC**. Para el índice **ICASup**, el primer proceso consistió en definir las reglas de decisión para generar el valor de presión en la microcuenca andina, como se presentan en la Tabla 4.6.

Las reglas combinan varios conjuntos difusos de entrada denominados antecedentes y se las asocian con un conjunto difuso de salida llamado consecuente. Las reglas difusas son proposiciones que permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Para expresar este conocimiento se precisan varias reglas, que se agrupan formando la base de conocimiento, la cual determina cual va a hacer el proceso de inferencia y la toma de decisiones de acuerdo con los valores de entrada del sistema. En el Anexo 4.6 se presenta un ejemplo de los cálculos del proceso de lógica difusa.

De igual forma, para el índice **ICASup**, se definen las reglas de decisión para evaluar el nivel de estado de la microcuenca andina, tal como se presentan en la Tabla 4.7.

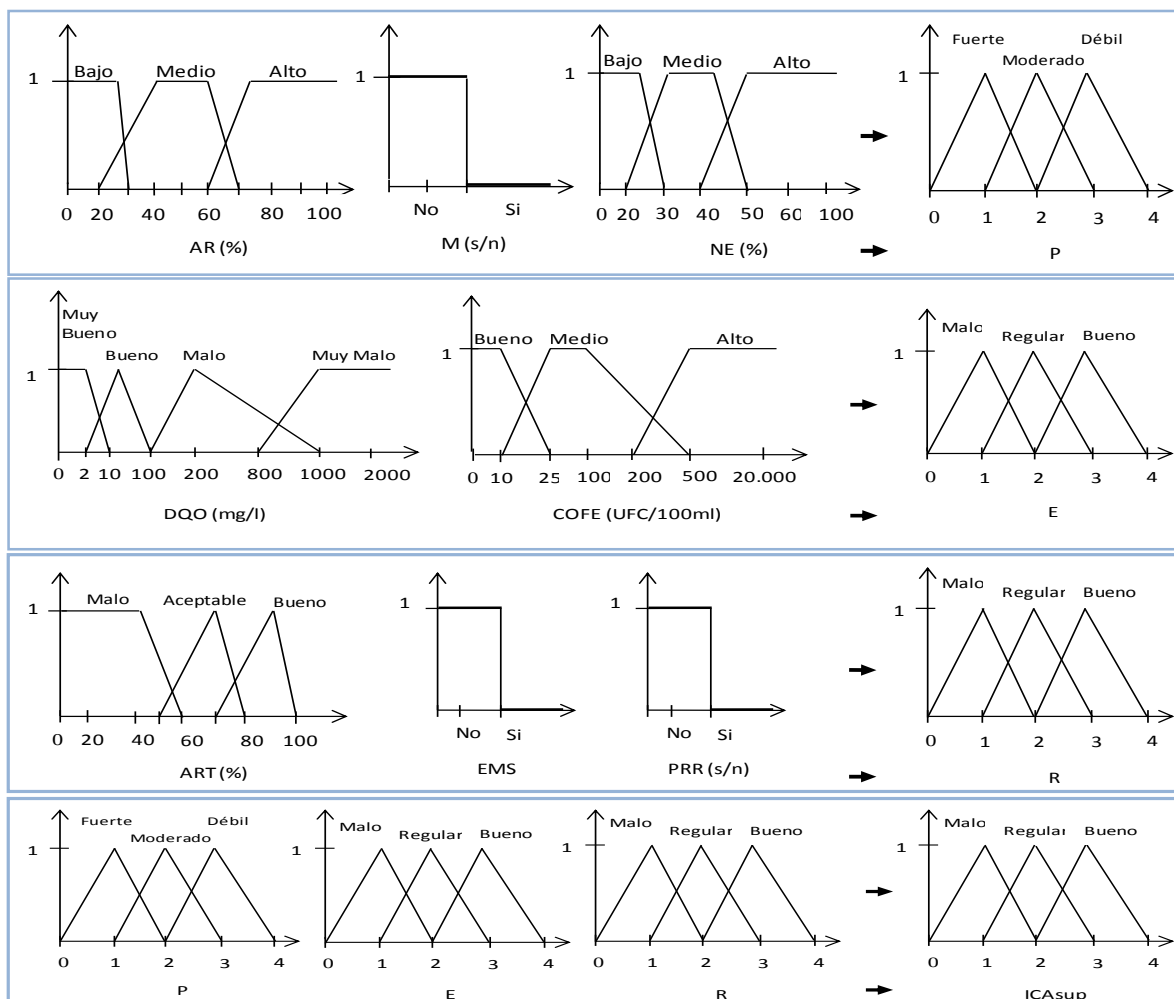


Figura 4.4 Funciones de pertenencia de indicadores PER para el índice ICAsup.

Tabla 4. 6 Reglas de decisión para el valor de presión del índice ICAsup.

No. Regla	AR	M	NE	P	REGLA
1	B	Si	B	F	IF (AR IS B) AND (M IS SI) AND (NE IS BAJO) THEN PRESION IS FUERTE
2	B	Si	M	F	IF (AR IS B) AND (M IS SI) AND (NE IS MEDIO) THEN PRESION IS FUERTE
3	B	Si	A	F	IF (AR IS B) AND (M IS SI) AND (NE IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE
4	M	Si	B	F	IF (AR IS M) AND (M IS SI) AND (NE IS BAJO) THEN PRESION IS FUERTE
5	M	Si	M	F	IF (AR IS M) AND (M IS SI) AND (NE IS MEDIO) THEN PRESION IS FUERTE
6	M	Si	A	F	IF (AR IS M) AND (M IS SI) AND (NE IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE
7	A	Si	B	F	IF (AR IS A) AND (M IS SI) AND (NE IS BAJO) THEN PRESION IS FUERTE
8	A	Si	M	F	IF (AR IS A) AND (M IS SI) AND (NE IS MEDIO) THEN PRESION IS FUERTE
9	A	Si	A	F	IF (AR IS A) AND (M IS SI) AND (NE IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE
10	B	No	B	D	IF (AR IS B) AND (M IS NO) AND (NE IS BAJO) THEN PRESION IS DEBIL
11	B	No	M	D	IF (AR IS B) AND (M IS NO) AND (NE IS MEDIO) THEN PRESION IS DEBIL
12	B	No	A	F	IF (AR IS B) AND (M IS NO) AND (NE IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE
13	M	No	B	M	IF (AR IS M) AND (M IS NO) AND (NE IS BAJO) THEN PRESION IS MODERADO
14	M	No	M	M	IF (AR IS M) AND (M IS NO) AND (NE IS MEDIO) THEN PRESION IS MODERADO
15	M	No	A	F	IF (AR IS M) AND (M IS NO) AND (NE IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE
16	A	No	B	F	IF (AR IS A) AND (M IS NO) AND (NE IS BAJO) THEN PRESION IS FUERTE
17	A	No	M	F	IF (AR IS A) AND (M IS NO) AND (NE IS MEDIO) THEN PRESION IS FUERTE
18	A	No	A	F	IF (AR IS A) AND (M IS NO) AND (NE IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE

Tabla 4. 7 Reglas de decisión para el valor de estado del índice **ICASup**.

No. Regla	DBO ₅	COFE	E	REGLA
19	MB	B	B	IF (DBO5 IS MUY_BUENA) AND (COFE IS BUENO) THEN ESTADO IS BUENO
20	MB	M	R	IF (DBO5 IS MUY_BUENA) AND (COFE IS MEDIO) THEN ESTADO IS REGULAR
21	MB	A	M	IF (DBO5 IS MUY_BUENA) AND (COFE IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO
22	B	B	B	IF (DBO5 IS BUENA) AND (COFE IS BUENO) THEN ESTADO IS BUENO
23	B	M	R	IF (DBO5 IS BUENA) AND (COFE IS MEDIO) THEN ESTADO IS REGULAR
24	B	A	M	IF (DBO5 IS BUENA) AND (COFE IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO
25	M	B	R	IF (DBO5 IS MALA) AND (COFE IS BUENO) THEN ESTADO IS REGULAR
26	M	M	M	IF (DBO5 IS MALA) AND (COFE IS MEDIO) THEN ESTADO IS MALO
27	M	A	M	IF (DBO5 IS MALA) AND (COFE IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO
28	MM	B	M	IF (DBO5 IS MUY_MALA) AND (COFE IS BUENO) THEN ESTADO IS MALO
29	MM	M	M	IF (DBO5 IS MUY_MALA) AND (COFE IS MEDIO) THEN ESTADO IS MALO
30	MM	A	M	IF (DBO5 IS MUY_MALA) AND (COFE IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO

Similarmente, para el índice ICASup, se definen las reglas de decisión para el valor de respuesta, como se presenta en la Tabla 4.8. Para generar el valor del índice ICASup, se generan las reglas de decisión considerando la combinación de los valores de presión, estado y respuesta, como se presenta en la Tabla 4.9. Estas reglas se aplican para cada una de las zonas de una microcuenca andina: alta, media y baja. En total para el índice **ICASup** se producen 69 reglas para cada zona, generando un total 207 reglas para este índice en toda la microcuenca andina.

Tabla 4. 8 Reglas de decisión para el valor de respuesta del índice **ICASup**.

No. Regla	ART	EMS	PRR	R	REGLA
31	B	Si	Si	B	IF (ART IS B) AND (EMS IS SI) AND (PRR IS SI) THEN RESPUESTA IS B
32	B	Si	No	M	IF (ART IS B) AND (EMS IS SI) AND (PRR IS NO) THEN RESPUESTA IS M
33	B	No	Si	M	IF (ART IS B) AND (EMS IS NO) AND (PRR IS SI) THEN RESPUESTA IS M
34	B	No	No	M	IF (ART IS B) AND (EMS IS NO) AND (PRR IS NO) THEN RESPUESTA IS M
35	A	Si	Si	R	IF (ART IS A) AND (EMS IS SI) AND (PRR IS SI) THEN RESPUESTA IS R
36	A	Si	No	M	IF (ART IS A) AND (EMS IS SI) AND (PRR IS NO) THEN RESPUESTA IS M
37	A	No	Si	M	IF (ART IS A) AND (EMS IS NO) AND (PRR IS SI) THEN RESPUESTA IS M
38	A	No	No	M	IF (ART IS A) AND (EMS IS NO) AND (PRR IS NO) THEN RESPUESTA IS M
39	M	Si	Si	R	IF (ART IS M) AND (EMS IS SI) AND (PRR IS SI) THEN RESPUESTA IS R
40	M	Si	No	M	IF (ART IS M) AND (EMS IS SI) AND (PRR IS NO) THEN RESPUESTA IS M
41	M	No	Si	M	IF (ART IS M) AND (EMS IS NO) AND (PRR IS SI) THEN RESPUESTA IS M
42	M	No	No	M	IF (ART IS M) AND (EMS IS NO) AND (PRR IS NO) THEN RESPUESTA IS M

De igual forma, el proceso seguido para la generación de reglas de decisión del índice **ICASup**, fue empleado para los otros cinco índices. Es así, como para el índice **IDS**, se generaron 66 reglas de decisión para cada una de las zonas, para un total de 198 reglas de decisión, ver Anexo 4.6. Para el índice **ICC**, se definieron 61 reglas de decisión para cada zona, generando un total de 183 reglas de decisión, ver Anexo 4.7. Para el índice **IGBA**, se generaron 69 reglas de decisión para cada zona de la microcuenca, para un total de 207 reglas de decisión, ver Anexo 4.8. Para el índice **IEDCA**, se definieron 51 reglas de decisión para cada zona de la microcuenca, generando en total 153 reglas de decisión, ver Anexo 4.9 y para el índice

IDIC, se generaron 51 reglas de decisión para cada zona de la microcuenca, generando en total 153 reglas de decisión, ver Anexo 4.10. En total el modelo *cuencandina* definió 1.101 reglas para la toma de decisiones en la planeación de una microcuenca andina.

Tabla 4. 9 Reglas de decisión para el índice ICAsup.

No. Regla	Zona cuenca	P	E	R	ICAsup	REGLA
43	A,M,B	D	B	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS D) AND (E IS B) AND (R IS B) THEN ICASUP_ALTA IS B
44	A,M,B	D	R	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS DEBIL) AND (E IS R) AND (R IS B) THEN ICASUP_ALTA IS B
45	A,M,B	D	M	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS D) AND (E IS M) AND (R IS B) THEN ICASUP_ALTA IS B
46	A,M,B	D	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS D) AND (E IS B) AND (R IS R) THEN ICASUP_ALTA IS R
47	A,M,B	D	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS D) AND (E IS R) AND (R IS R) THEN ICASUP_ALTA IS R
48	A,M,B	D	M	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS D) AND (E IS M) AND (R IS R) THEN ICASUP_ALTA IS R
49	A,M,B	D	B	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS D) AND (E IS B) AND (R IS M) THEN ICASUP_ALTA IS R
50	A,M,B	D	R	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS D) AND (E IS R) AND (R IS M) THEN ICASUP_ALTA IS R
51	A,M,B	D	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS D) AND (E IS M) AND (R IS M) THEN ICASUP_ALTA IS M
52	A,M,B	M	B	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS M) AND (E IS B) AND (R IS B) THEN ICASUP_ALTA IS B
53	A,M,B	M	R	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS M) AND (E IS R) AND (R IS B) THEN ICASUP_ALTA IS B
54	A,M,B	M	M	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS M) AND (E IS M) AND (R IS B) THEN ICASUP_ALTA IS B
55	A,M,B	M	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS M) AND (E IS B) AND (R IS R) THEN ICASUP_ALTA IS R
56	A,M,B	M	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS M) AND (E IS R) AND (R IS) THEN ICASUP_ALTA IS R
57	A,M,B	M	M	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS M) AND (E IS M) AND (R IS R) THEN ICASUP_ALTA IS R
58	A,M,B	M	B	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS M) AND (E IS B) AND (R IS M) THEN ICASUP_ALTA IS R
59	A,M,B	M	R	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS M) AND (E IS R) AND (R IS M) THEN ICASUP_ALTA IS R
60	A,M,B	M	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS M) AND (E IS M) AND (R IS M) THEN ICASUP_ALTA IS M
61	A,M,B	F	B	B	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS F) AND (E IS B) AND (R IS B) THEN ICASUP_ALTA IS R
62	A,M,B	F	R	B	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS F) AND (E IS R) AND (R IS B) THEN ICASUP_ALTA IS R
63	A,M,B	F	M	B	M	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS F) AND (E IS M) AND (R IS B) THEN ICASUP_ALTA IS M
64	A,M,B	F	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS F) AND (E IS B) AND (R IS R) THEN ICASUP_ALTA IS R
65	A,M,B	F	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS F) AND (E IS R) AND (R IS R) THEN ICASUP_ALTA IS R
66	A,M,B	F	M	R	M	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS F) AND (E IS M) AND (R IS R) THEN ICASUP_ALTA IS M
67	A,M,B	F	B	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS F) AND (E IS B) AND (R IS M) THEN ICASUP_ALTA IS M
68	A,M,B	F	R	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS F) AND (E IS R) AND (R IS M) THEN ICASUP_ALTA IS M
69	A,M,B	F	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ALTA) AND (P IS F) AND (E IS M) AND (R IS M) THEN ICASUP_ALTA IS M

4.4.4 Intervenciones recomendadas para una microcuenca andina

Considerando que los índices de sostenibilidad ambiental definidos generan un valor cualitativo del estado de una microcuenca andina, es importante generar recomendaciones de intervenciones para cada una de las zonas de la cuenca: alta, media y baja y definidas en el corto, mediano y largo plazo. Es así como, a través de la definición del modelo conceptual definido en el capítulo 3 y el proceso de gestión de conocimiento, se presentan en la Tabla 4.11 las intervenciones recomendadas para la zona alta de una microcuenca para el índice ICASup, las intervenciones para las otras zonas de la microcuenca se presentan en el Anexo 4.11. Las intervenciones generadas por los valores generados del índice IDS, se presentan en el Anexo 4.12. Las intervenciones recomendadas dados los valores del índice ICC, se encuentran en el

Anexo 4.13. Las intervenciones de acuerdo a los valores del índice IGBA, están en el Anexo 4.14. Las intervenciones recomendadas dados los valores del índice IEDCA, se presentan en el Anexo 4.15 y las intervenciones debido a los valores del índice IDIC, se presentan en el Anexo 4.16.

Tabla 4. 10 Intervenciones para la zona alta en una microcuenca andina por el índice ICASup.

Zona de la cuenca	Valor Índice ICASup	Acciones recomendadas		
		Corto Plazo < 2 años	Mediano Plazo (2 y 5 años)	Largo Plazo (> 5 años)
Cuenca alta	M	Implementar acciones para conservar y restaurar ecosistemas estratégicos: bosques y franjas protectoras de las fuentes superficiales.	Evaluar las acciones implementadas para conservar y restaurar ecosistemas estratégicos: bosques y franjas protectoras de las fuentes superficiales.	Generar estrategias para la sostenibilidad de las acciones implementadas para conservar y restaurar ecosistemas estratégicos.
		Implementar acciones para prevenir y controlar la erosión y la sedimentación: revegetación y reforestación.	Evaluar las acciones implementadas para prevenir y controlar la erosión y la sedimentación.	Generar estrategias para la sostenibilidad de las acciones implementadas para prevenir y controlar la erosión.
		Abandono de cultivos y actividad ganadera. Construir cortafuegos y drenajes fluviales	Continuar con las políticas de no a los cultivos y actividad ganadera.	Continuar con las políticas de no a los cultivos y actividad ganadera
		Si hay minería, debe erradicarse en su totalidad. Definir estrategias para no dejar implementar minería en la zona.	Implementar estrategias de cerrado de minería. Evaluar e implementar estrategias para no dejar implementar minería en la zona alta.	Evaluar los impactos negativos y positivos del proceso de minería en la zona alta.
		Identificar los bienes y servicios ecosistémicos	Implementar un esquema de compensación y pago de bienes y servicios ecosistémicos por parte de la comunidad de la cuenca media y baja	Evaluar sostenibilidad del esquema de compensación de bienes y servicios ecosistémicos
	R	Implementar acciones para conservar y restaurar ecosistemas estratégicos: bosques y franjas protectoras de las fuentes superficiales.	Evaluar las acciones implementadas para conservar y restaurar ecosistemas estratégicos: bosques y franjas protectoras de las fuentes superficiales.	Generar estrategias para la sostenibilidad de las acciones implementadas para conservar y restaurar ecosistemas estratégicos.
		Implementar acciones para prevenir y controlar la erosión y la sedimentación: revegetación y reforestación.	Evaluar las acciones implementadas para prevenir y controlar la erosión y la sedimentación.	Generar estrategias para la sostenibilidad de las acciones implementadas para prevenir y controlar la erosión.
		Abandono de cultivos y actividad ganadera. Construir cortafuegos y drenajes fluviales	Continuar con las políticas de no a los cultivos y actividad ganadera.	Continuar con las políticas de no a los cultivos y actividad ganadera
		Si hay minería, debe erradicarse en su totalidad. Definir estrategias para no dejar implementar minería en la zona.	Implementar estrategias de cerrado de minería. Evaluar e implementar estrategias para no dejar implementar minería en la zona alta.	Evaluar los impactos negativos y positivos del proceso de minería en la zona alta.
		Identificar los bienes y servicios ecosistémicos	Implementar un esquema de compensación y pago de bienes y servicios ecosistémicos	Evaluar sostenibilidad del esquema de compensación de bienes y servicios ecosistémicos
	B	Generar estrategias para no dejar implementar minería en la zona alta	Implementación de estrategias para no dejar implementar minería en la zona alta	Evaluar estrategias para no dejar implementar minería en la zona alta
		Implementar acciones para conservar ecosistemas estratégicos: bosques y franjas protectoras de las fuentes superficiales.	Evaluar las acciones implementadas para conservar ecosistemas estratégicos: bosques y franjas protectoras de las fuentes superficiales.	Generar estrategias para la sostenibilidad de las acciones implementadas para conservar ecosistemas estratégicos.
		Generar estrategias para continuar con pocos vertimientos en las fuentes superficiales	Evaluar estrategias para continuar con pocos vertimientos a las fuentes superficiales	Evaluar estrategias para continuar con pocos vertimientos a las fuentes superficiales
		Identificar los bienes y servicios ecosistémicos	Implementar un esquema de compensación y pago de bienes y servicios ecosistémicos	Evaluar sostenibilidad del esquema de compensación de bienes y servicios ecosistémicos
		Generar estrategias para evitar la colonización, agricultura y ganadería en esta zona	Continuar y evaluar las políticas para evitar la colonización, agricultura y ganadería en esta zona.	Continuar y evaluar las políticas para evitar la colonización, agricultura y ganadería en esta zona.

1.18

1.19 4.5 DISCUSIÓN

La planeación de una cuenca hidrográfica es un proceso complejo que debe considerar integradamente diversos subsistemas para la toma de decisiones, sin embargo, estos subsistemas se tratan a

menudo por separado, y no se aborda la planeación de cuencas hidrográficas como un proceso integrado y dinámico (Chau, 2007). Como un aporte a la problemática anterior, se define en este capítulo el modelo basado en conocimiento (MBC) denominado *cuencandina*, cuyo objetivo es apoyar la toma de decisiones en la planeación de microcuencas andinas en Colombia, a través del cálculo de seis índices cualitativos. Este modelo es un apoyo para la toma de decisiones en la definición de políticas e intervenciones por diversos actores en una microcuenca andina.

Los índices definidos se conceptualizan en cuatro subsistemas: bio-físico, socio-económico, político-institucional y conocimiento e información. El MBC *cuencandina*, al igual que el MBC que desarrolló Kaewboonma (2013) para la gestión de inundaciones, adquiere datos, información y conocimiento a través de diversas fuentes: revisión de literatura, expertos y entrevistas con actores de cuencas hidrográficas. Diversos MBC se han desarrollado para la toma de decisiones de los recursos hídricos en aspectos específicos: manejo de aguas grises (Al-Jayyousi, 2004), clasificación de aguas costeras (Carvalho y Favilla, 2009a) estimación de la calidad de agua (Chau, 2007), entre otros, pero ninguno para la planeación de cuencas hidrográficas, en general y en particular para microcuencas andinas.

El modelo *cuencandina* define seis índices asociados a cuatro subsistemas, que permiten una visión integrada de la CH: calidad de agua, degradación del suelo, cambio climático, educación y cultura del agua, gobernanza del agua, y conocimiento e información, mientras otros estudios para evaluar la sostenibilidad de una cuenca hidrográfica como el índice WSI (Watershed Sustainability Index): definió cuatro sub-índices: hidrología, ambiente, vida y política (Chaves y Alipaz, 2007; Firdaus *et al.*, 2014), mientras Lee y Chung (2007) definieron el índice WEI (Watershed Evaluation Index) a través de tres sub-índices: potencial de agotamiento de caudales, potencial de daños por inundación potencial y potencial deterioro de la calidad de agua, este último asociado a la calidad y cantidad de agua (Lee y Chung, 2007).

Los índices son considerados herramientas estratégicas para el apoyo a las decisiones a nivel de gestión de políticas y toma de decisiones. Los usuarios de índices son gestores de política, líderes políticos, líderes comunitarios y diversos actores quienes los utilizan para mostrar e interpretar situaciones puntuales y tendencias generales (Buccheri y Comellas, 2011). Gobiernos y organizaciones están utilizando índices para hacer elecciones entre beneficios de actividades y objetivos de sostenibilidad (Mayer *et al.*, 2014). En el desarrollo de un índice, la selección de indicadores son importantes, estos generalmente son generados a través de la revisión de literatura, entrevistas con expertos, actores y tomadores de decisiones (Juwana *et al.*, 2012).

El MBC *cuencandina* define un sistema de indicadores PER para estimar los seis índices definidos, similarmente a los estudios de Chavez y Alipaz (2007) y Firdaus (2014) en la conceptualización del índice WSI y al estudio de Lee y Chung (2007) para el índice WEI, pero contrario a lo reportado por Kim (2014), Valenzuela y Matarán (2008) y Manoliadis (2002), quienes definieron indicadores PER para evaluaciones

puntuales en la cuenca hidrográfica como: calidad y cantidad de agua, evaluación espacial en una costa y uso eficiente del agua, respectivamente.

La ventaja del modelo PER es que incorpora relaciones de causa-efecto entre indicadores, apoya actores y tomadores de decisiones, y permite ver las interconexiones entre estos (OECD, 2004). Indicadores PER han mostrado ser una metodología apropiada para conceptualizar problemas ambientales, en general y problemas en la gestión de los recursos hídricos en particular. Es así como han sido utilizados por diversos autores en la conceptualización de problemáticas ambientales (Camacho-Sandoval y Duque, 2001; Gobin *et al.*, 2004; Hughey *et al.*, 2004; Wolfslehner y Vacik, 2008).

Se utilizó el modelo de lógica difusa para operar los índices e indicadores PER definidos en el modelo *cuencandina*. Los sistemas difusos utilizados proporcionan un mecanismo intuitivo y de alto nivel para representar el conocimiento, favorecen la incorporación de conocimiento para la toma de decisiones y generan una alta interpretabilidad, para usuarios no expertos en estas técnicas. Muchos modelos han sido desarrollados utilizando lógica difusa para el apoyo a la planeación de cuencas hidrográficas, pero estos están centrados en evaluación de aspectos puntuales y no en una planeación integral que involucre diversos subsistemas de la cuenca, como los estudios de Ocampo-Duque, *et al.* (2013), Gonzales (2012), Cheng y Chang (2012) y Kim (2013), entre otros.

De los estudios revisados ninguno integra gestión de conocimiento, lógica difusa e indicadores PER para la planeación de cuencas hidrográficas, están focalizados a aspectos puntuales de los recursos hídricos como son los estudios de Zhiyi y Yixin (2010) y Zhao y Tao (2010). Sin embargo, el modelo más parecido al modelo *cuencandina*, en cuanto a metodología y objetivo se denomina SAFE (Sustainability Assessment by Fuzzy Evaluation), pues integra el modelo PER y el modelo de lógica difusa y fue creado para medir la sostenibilidad de una ciudad (Phillis y Andriantiatsaholainaina, 2001; Phillis *et al.*, 2011), pero este no genera intervenciones recomendadas en la ciudad.

Para operar el MBC *cuencandina* es necesario generar una herramienta computacional adecuada, fácil y confiable. El modelo está diseñado con un esquema modular que permite flexibilidad para la evaluación de cada uno de los índices, cada uno de los subsistemas y cada zona de la cuenca de manera independiente. El MBC, a pesar que está enfocado para el apoyo a la toma de decisiones en la planeación de microcuencas andinas, se podría evaluar la posibilidad de uso en otro tipo de microcuencas y escalar a otro tamaño de cuencas hidrográficas a nivel nacional e internacional. De igual forma, es necesario revisar, evaluar y actualizar continuamente el modelo presentado a través de talleres y una gama amplia de aplicaciones.

4.6 CONCLUSIONES

Este capítulo presenta la construcción de un nuevo modelo basado en conocimiento (MBC) denominado *cuencandina*, que integra diversos subsistemas para la toma de decisiones: bio-físico, socio-

económico, político-institucional y conocimiento e información. El MBC se conceptualiza a través de la definición de 18 índices cualitativos, 6 para cada zona de la cuenca, y son operados a través de la integración de las técnicas analíticas: presión-estado-respuesta (PER), lógica difusa y gestión de conocimiento, estos últimos definidos dentro de las técnicas de la inteligencia artificial. El modelo *cuencandina* aborda la complejidad y los principales problemas de una cuenca hidrográfica en Colombia y está conceptualizado para aplicarse como un apoyo a la toma de decisiones en la planeación de microcuencas andinas en Colombia.

A partir del modelo conceptual y la tipificación de problemas, se construyó un nuevo modelo basado en conocimiento (MBC) denominado *cuencandina*, que integra cuatro subsistemas: bio-físico, socio-económico, político-institucional y conocimiento e información. En el subsistema bio-físico se definieron 3 temas estratégicos y 3 índices asociados: tema 1: calidad de agua; índice 1: índice de calidad de agua superficial (**ICASup**), tema 2: degradación del suelo; índice 2: índice de degradación del suelo (**IDS**) y tema 3: cambio climático; índice 3: índice de cambio climático (**ICC**). En el subsistema socio-económico se definió un tema y un índice asociado: tema: educación y cultural del agua, índice: índice de educación y cultural del agua (**IEDCA**).

El MBC es un avance en los procesos de modelación de conocimiento para la toma de decisiones en la gestión integrada de una cuenca hidrográfica. Así mismo, genera intervenciones considerando el valor de cada índice, a través de la variación espacial en la microcuenca: cuenca alta, media y baja y la variación temporal de las intervenciones en corto, mediano y largo plazo. El MBC se convierte en un apoyo para la toma de decisiones informada, objetiva y metódica. Para facilitar el uso y ampliar la gama de potenciales usuarios del modelo *cuencandina* es necesario generar una herramienta computacional que permita una amplia difusión y fácil operación.

5. PROTOTIPO WEB DE UN SISTEMA SOPORTE A LAS DECISIONES (SSD) PARA LA PLANEACIÓN DE MICROCUENCAS ANDINAS – CUENCANDINA.

5.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas soporte a la decisión (SSD) son sistemas computarizados que integran diversos modelos matemáticos y estrategias para el apoyo a las decisiones en varios campos del conocimiento. Un tipo particular de un SSD son los sistemas basados en conocimiento (SBC). Un SBC es un sistema computacional capaz de identificar relaciones y vínculos basados en conocimiento de diferentes fuentes de información entre los que se destacan expertos, científicos, actores, libros, artículos científicos, páginas Web, talleres, simposios, entre otros. En este capítulo se presenta el desarrollo de un prototipo Web de un SSD basado en conocimiento, SSD-BC-Web, denominado *cuencandina*, para el apoyo a la toma de decisiones en microcuencas andinas. El prototipo Web se construye a partir del Modelo Basado en Conocimiento (MBC) presentado en el Capítulo 4. La metodología de desarrollo computacional fue la Programación Extrema (XP: Extreme Programming) y el código se desarrolló utilizando una combinación de lenguajes de programación de código abierto: *PostgreSQL*, *Java*, *Ajax-jQuery* y *jFuzzyLogic*. Este prototipo Web es un SSD basado en conocimiento para apoyar la toma de decisiones de diversos actores en una microcuenca andina.

5.2 REVISIÓN DE LITERATURA

5.2.1 Herramientas para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos

Diversas herramientas analíticas y computacionales se han desarrollado para el apoyo a la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos. Entre las herramientas analíticas se encuentran: modelos matemáticos de simulación y optimización, sistemas de información geográfica (SIG) y bases de datos, sistemas expertos, decisiones multicriterio y sistemas soporte a la decisión (SSD o DSS, por sus siglas en inglés Decision System Support). Las herramientas más utilizadas para el apoyo a la planeación de los recursos hídricos se encuentran los modelos matemáticos, de optimización o simulación y dentro de estos existe una amplia gama (Debele *et al.*, 2006).

Algunos de los modelos matemáticos más sofisticados y completos que manejan interacciones complejas, y permiten evaluar escenarios futuros y explorar intercambios entre opciones, son (Sulis y Sechi, 2013): AQUATOOL (Universidad Politécnica de Valencia), ModSim (Colorado State University), RIBASIM (Deltares), wargi-SIM (Universidad de Cagliari) y WEAP (Instituto Ambiental de Estocolmo-Boston, Massachusetts). Estos modelos son representativos de los modelos de simulación utilizados para la generación de planes y políticas del agua y se han aplicado en todo el mundo en un gran número de sistemas

de recursos hídricos e incorporan la mayoría de los atributos deseables en un modelo de simulación (Sulis y Sechi, 2013). Cada modelo tiene sus propias características y utiliza diferentes métodos para definir escenarios y estrategias de acción. Una corta descripción se presenta a continuación, indicando sus objetivos y posibles limitaciones.

WEAP (Water Evaluation And Planning) es un modelo de simulación genérico, que integra procesos hidrológicos físicos con gestión de demandas e infraestructura, para permitir análisis de múltiples escenarios, incluyendo escenarios de cambio climático y factores de estrés antropogénicos. El objetivo principal en la gestión del agua es la configuración de la demanda de agua. Otros objetivos son: operaciones de embalse, generación de energía hidroeléctrica, calidad del agua y evaluaciones de vulnerabilidad, entre otros (Bhave *et al.*, 2013; Dimova *et al.*, 2014; Swiech *et al.*, 2012). Tiene un módulo de análisis financiero para analizar el costo-beneficio de distintas alternativas de gestión en escenarios futuros y evaluar acciones propuestas para abordar escasez de agua en condiciones de cambio climático (Flores-Lopez *et al.*, 2012). WEAP requiere datos significativos de clima y demanda de agua, y se necesita personal con experiencia para el análisis de los resultados (Dimova *et al.*, 2014; Sulis y Sechi, 2013).

AQUATOOL es un modelo de simulación que consiste de varios módulos: módulo de gestión para evaluar riesgo de sequía (SimRisk), módulo de optimización y módulo de simulación de distribución de aguas subterráneas. Permite al usuario reproducir pérdidas de agua, conexiones hidráulicas entre nodos, embalses y acuíferos y limitaciones de flujo basados en elevación. El modelo fue diseñado para las etapas de gestión y planificación operativa de toma de decisiones en cuencas hidrográficas complejas que comprenden múltiples embalses, acuíferos y centros de demanda (Sulis y Sechi, 2013). AQUATOOL facilita el análisis de los efectos de la gestión del agua y la calidad de las alternativas y escenarios en aspectos relevantes de una cuenca hidrográfica (Momblanch *et al.*, 2014), compara la asignación del agua de acuerdo a diferentes estrategias de gestión con el fin definir el plan de gestión del agua más óptimo (Milano *et al.*, 2013). Para utilizar con eficacia todas las características, se requiere un alto nivel de habilidad y experiencia en recursos de modelación (Sulis y Sechi, 2013).

El modelo ModSim relacionado con MODFLOW permite el análisis integrado de aguas subterráneas y superficiales, igual que QUAL2E, para evaluar la eficacia de estrategias de control de la contaminación. El uso del módulo principal requiere una formación moderada, mientras que los módulos externos son muy difíciles de usar sin previas habilidades de modelado (Sulis y Sechi, 2013). Mientras, el modelo RIBASIM aborda la descripción hidrológica e hidrográfica de una cuenca hidrográfica, permite al usuario definir escenarios de planificación de suministro de agua, es intuitivo y fácil de usar, pero requiere un número considerable de datos para realizar un análisis detallado y el modelo wargi-SIM propone medidas de mitigación por sequía, el requisito de la simulación-optimización es analizar el complejo sistema de agua en condiciones de sequía. Wargi-SIM es un modelo relativamente simple que permite a los no expertos

comprender las principales ítems y los problemas de la complejidad de los sistemas de agua (Sulis y Sechi, 2013).

Sin duda los modelos de simulación son un gran aporte a la toma de decisiones en la gestión integrada de los recursos hídricos, se cuenta con un gran número de ellos y se tiene una alta percepción de su utilidad con respecto a informar y apoyar a las autoridades de gestión del agua, sin embargo, tal como opina Assaf y Saadeh (2008), hay muchas mejoras que se podrían hacer para mejorar el trabajo y la toma de decisiones de planificadores, gestores, modeladores y analistas en el área de la gestión de los recursos hídricos. De igual forma, aunque algunos modelos de simulación trabajan aspectos integrales en la planeación de cuencas hidrográficas, el énfasis está en el subsistema bio-físico y generalmente, estos modelos requieren bases de datos sólidas, de diversos parámetros, con una amplia variación espacial y temporal, que permitan calibrar y simular diversos escenarios de acción. Así mismo, requieren personal especializado y entrenado para la aplicación, análisis e interpretación de resultados del modelo, generalmente son programas propietarios, que requieren la adquisición de licencias para su uso y no están disponible en Web.

5.2.2 Sistemas soporte a la decisión (SSD) aplicados a la gestión de los recursos hídricos

El proceso de toma de decisiones en sistemas ambientales es una tarea compleja, debido a la cantidad de factores a ser considerados simultáneamente para obtener decisiones (Gibert *et al.*, 2010). La visión de desarrollo sostenible conlleva nuevas y complejas situaciones de planeación, confrontando a los actores, definidores de política y tomadores de decisiones con las condiciones políticas cambiantes, con diferentes contenidos en el proceso de decisión y nuevas herramientas de trabajo y planeación (Kain y Söderberg, 2008). Así mismo, debido a la compleja naturaleza de los problemas de gestión de recursos hídricos, incluyendo la falta de consonancia, datos incompletos e incertidumbres, el proceso de búsqueda de decisiones no puede limitarse a la solución de optimización matemática o realizar simulaciones complejas (Salewicz y Nakayama, 2004). Es así, como se han desarrollado herramientas para el apoyo a la toma de decisiones denominadas Sistemas Soporte a la Decisión (SSD o DSS por sus siglas en Inglés Decision Support System).

Un SSD opera combinando diversos modelos matemáticos de simulación y diversas herramientas para la toma de decisiones (Engel *et al.*, 2003; Gourbesville, 2008; Karmakar *et al.*, 2007; Lautenbach *et al.*, 2009; Röpke *et al.*, 2004; Salewicz y Nakayama, 2004). Un SSD es una herramienta computacional, adaptable, flexible e interactiva, desarrollada para soportar conocimiento, solución de problemas de manejo estratégico, complejos, pobremente estructurados o no estructurados para apoyar la toma de decisiones (Lautenbach *et al.*, 2009; Le Bars y Le Grusse, 2008; Matthies *et al.*, 2006; Matthies *et al.*, 2007; Znidarsic *et al.*, 2006). Un SSD apoya a los tomadores de decisiones y actores a definir y discutir diferentes problemas

y acercarse a posibles soluciones y acciones a seguir (Andersson *et al.*, 2012), contribuye a la calidad y transparencia en el proceso de toma de decisiones en problemas complejos y facilita la comunicación e información entre los diversos actores (Giupponi, 2007; Znidarsic *et al.*, 2006). Esta perspectiva permite alcanzar decisiones mediante la combinación de juicio personal con información que proporcionan estas herramientas (Salewicz y Nakayama, 2004).

Diversos SSD se han desarrollado para apoyar a los administradores y organizaciones encargadas de la gestión de los recursos hídricos, entre los que se destacan: Elbe-DSS (Lautenbach *et al.*, 2009) que estudia la concentración y emisión de nutrientes (nitrógeno y fosforo) mediante la acción de diversos escenarios: reforestación, control de erosión y agricultura ecológica. UWOT-DSS (Makropoulos *et al.*, 2008) diseñado para el manejo del agua a nivel urbano, considerando abastecimiento de agua, disposición de aguas residuales y drenaje de agua lluvia., modelo basado en SIG, para apoyar la toma de decisiones a los usuarios afectados por escasez de agua, en la cuenca de Idaho. DSS-MWF (Le Bars y Le Grusse, 2008) modelo basado en SIG, para apoyar a usuarios afectados por escasez de agua.

De igual forma, SMART-DSS estudia el manejo sostenible de la escasez de agua en zonas costeras (Harmancioglu *et al.*, 2008). ComMod-DSS (Becu *et al.*, 2008) apoya la negociación y el proceso de toma de decisiones colectivas en el manejo del recurso hídrico. DSS-MWF (Le Bars y Le Grusse, 2008) permite evaluar y simular escenarios, relacionados con la producción agrícola considerando disponibilidad de agua. DSS (GIS-based) (Assaf y Saadeh, 2008) apoya los decisores de política y otros actores para evaluar planes de calidad de agua. IWM-DSS (Lee *et al.*, 2008a) genera una planeación y manejo integral de una cuenca, en agotamiento del recurso, mejoramiento del flujo y calidad de agua. DSS-PAE (Rogers y Louis, 2009) estima soluciones eficientes para asignar recursos financieros limitados para la consolidación de sistemas de agua comunitarios.

Así mismo, IWRAM-DSS (Merritt *et al.*, 2004) explora el impacto biofísico de cambios de cultivo, clima y condiciones hidrológicas sobre el uso de los recursos hídricos y el suelo. SIM-DSS (Araújo *et al.*, 2000) evalúa la vulnerabilidad de la sociedad y los ecosistemas sobre la disponibilidad de agua de la zona semi-árida de Brazilia. WCGE (Feng *et al.*, 2007) evalúa a nivel macro el impacto socio-económico del proyecto de transferencia de agua del Sur al Norte de China. Mulino-mDSS (Giupponi, 2007; Giupponi *et al.*, 2004; Giupponi y Vladimirova, 2006) aporta metodologías y herramientas para la implementación de la DMA de la Unión Europea (2000), Elbe-DSS (Matthies *et al.*, 2006) evalúa la cantidad de agua, la calidad química y el estado ecológico del río Elbe y Elbe-DSS (De Kok *et al.*, 2009) desarrolla un prototipo para evaluar calidad de agua relacionada al uso del suelo y el tratamiento de agua residual, riesgo de inundaciones y navegación del río.

Como se puede evidenciar existe una amplia gama de SSD para el apoyo a la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos, sin embargo, no se asume la planeación de una cuenca hidrográfica en su

totalidad considerando los diversos subsistemas presentes en la misma. Generalmente, estos SSD están basados en la combinación de modelos matemáticos para la simulación de la calidad y cantidad de agua, sin considerar la cuenca hidrográfica como un sistema integrado por diversos componentes. Adicionalmente, la calidad de los resultados está directamente relacionada con la disponibilidad y calidad de los datos usados (Kaewboonma *et al.*, 2013a), de igual forma, muchos usuarios no poseen el conocimiento para la recolección de datos de entrada, construcción algorítmica del modelo y evaluar sus resultados, lo cual puede llevar a una baja utilización o el fracaso de estos sistemas (Chau, 2006). Así mismo, DSS comprenden varios modelos individuales y generalmente el proceso de calibración y validación se vuelve más exigente, necesitando datos que a menudo no están disponibles (van Delden *et al.*, 2011). Por lo anterior, es necesario que los SSD deben desarrollarse hacia una visión sistémica de los problemas de decisión, el cual incluya aspectos sociales, económicos y ambientales (Matthies *et al.*, 2007; Znidarsic *et al.*, 2006).

Según Giupponi *et al.* (2004) muy pocos DSS han probado ser efectivos y verdaderamente operacionales. Para De Kok *et al.* (2009) se han observado pocos ejemplos prácticos de la apropiación de estos instrumentos en las organizaciones encargadas del manejo de recursos hídricos. Así mismo, Gourbesville (2008) infiere que a pesar de involucrar a los potenciales usuarios durante el diseño y el esfuerzo dedicado sobre el marco para el manejo integrado del agua, existen aún pocos ejemplos prácticos de organizaciones que usen estos instrumentos para análisis de políticas y propósitos de comunicación (Gourbesville, 2008). La mayoría de DSS son poco prácticos, se requerirá personal capacitado y un conjunto de datos históricos y sólidos, y de estos un número limitado es basado en la Web.

5.2.3 Sistemas soporte a la decisión basados en conocimiento (SBC) en recursos hídricos

Los SSD han ido evolucionando hacia el uso de técnicas de la inteligencia artificial (IA) denominados IDSS (intelligence decision support systems); estos sistemas juntan el juicio humano con conocimiento computarizado para proveer apoyo a los tomadores de decisión en el análisis de situaciones no estructuradas o pobremente estructuradas (Quintero *et al.*, 2005). Entre los métodos y algoritmos de la IA se encuentran los sistemas basados en conocimiento (SBC o KBS, por sus siglas en inglés Knowledge-Based System), algoritmos genéticos, redes neuronales artificiales y sistemas de inferencia de lógica difusa (Chau, 2006). Un SBC es un sistema computacional que une la lógica humana, en el proceso de decisión, con varias fuentes de conocimiento y factores sociales, organizacionales, técnicos, económicos, gubernamentales, ambientales (Abdul *et al.*, 2009) y bases de datos de un campo específico de conocimiento (Huang, 2009). Este conocimiento es almacenado en un sistema computacional y los usuarios pueden utilizarlo para recomendaciones o toma de decisiones específicas como un humano; el sistema puede dar recomendaciones y explicaciones, si es necesario, sobre la lógica de la recomendación (Torres, 2007).

Para el apoyo a la gestión de los recursos hídricos se han desarrollado diversos SBC, con diversos objetivos, entre los que se destacan: KBS_{LUA} (Lee *et al.*, 2008b) para evaluación de planes de uso del suelo en riberas de ríos, SBC para estimar el estado ecológico de aguas costeras (Carvalho y Favilla, 2009b), SBC para simular calidad y cantidad de agua en zonas costeras (Chau y Chen, 2001), SBC para pronósticos de cantidad de agua en una cuenca hidrológica a través de la integración de MBC y modelos estadísticos de manejo de datos (Corzo y Solomatine, 2007a), SBC para evaluación de sedimentos en una cuenca hidrográfica a través de MBC (Dai *et al.*, 2004), SBC para supervisar floculación en un proceso de lodos activados (Comas *et al.*, 2003), SBC para evaluación de planes de desarrollo para el uso del suelo en la riberas de ríos (Lee *et al.*, 2008b), SBC para la evaluación de las causas de eutroficación en ríos por enriquecimiento de nutrientes (Llorens *et al.*, 2009).

Igualmente, SBC para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos, mediante SIG y lógica difusa (Zhu *et al.*, 2014), SBC para analizar problemas de flujo de escombros en el río Chen-Yu-Lan, Taiwan (Wan y Lei, 2009), SBC para clasificar impactos de nitrógeno, azufre y ácidos orgánicos en la química del agua de un lago (Sullivan *et al.*, 2005) y se combinó conocimiento y datos locales de expertos para mejorar el modelado de redes de abastecimiento de agua (Scholten *et al.*, 2013). Adicionalmente, un SBC para clasificar la química del agua en un lago (Saunders *et al.*, 2005), un SBC para valorar el conocimiento local para apoyar agricultores en la estimación de la calidad de agua (Oliver *et al.*, 2012). De igual forma, un SBC para la gestión de riego a través de conocimiento y modelos biofísicos (Merot y Bergez, 2010), un SBC para investigar suelos contaminados (Martin y Toll, 2006) y un SBC que integra conocimiento empírico y heurístico para evaluar la eutrofización en corrientes de agua (Llorens *et al.*, 2009).

De lo anterior, se puede establecer que existe una amplia gama de SBC que se han desarrollado para el apoyo de diversos aspectos relacionados con la gestión de los recursos hídricos, lo cual verifica la importancia y el apoyo que brindan en el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, no se encontró literatura sobre SBC para la planeación de una cuenca hidrográfica en general y en particular, para una microcuenca andina. Los SBC tienen objetivos puntuales, pero no abordan de manera integral el proceso de planeación de una cuenca hidrográfica. Si bien estos sistemas permiten apoyar la toma de decisiones relacionadas con algún aspecto bio-físico de la cuenca hidrográfica, no están diseñados para trabajar la cuenca hidrográfica de manera integrada con otros subsistemas.

5.2.4 Sistemas soporte a la decisión en recursos hídricos operando en Web

Las tecnologías de la World Wide Web han transformado el diseño, desarrollo, implementación y despliegue de los SSD (Bhargava *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2002), así mismo Duan *et al.* (2005) argumentan que los rápidos avances de las tecnologías de Internet han abierto nuevas oportunidades para mejorar los

tradicionales DSS y SBC, considerando que el objetivo de un SBC es imitar la experticia y distribuir el conocimiento experto para no-expertos y expertos.

Se han encontrado en la literatura diversos sistemas desarrolladas en Web con diversos objetivos en la planeación de recursos hídricos, entre ellos: modelación del proceso de pronósticos de flujos en un reservorio (Li *et al.*, 2006), identificación de lugares geográficos para proyectos ambientales (Ghaemi *et al.*, 2009), simulación a gran escala de procesos hidrodinámicos (Islam y Piasecki, 2008), herramienta para priorizar problemas ambientales y de recursos naturales (Zhu y Dale, 2001), gestión de grandes ríos internacionales (Salewicz y Nakayama, 2004), gestión y planificación de una reserva forestal (Rao *et al.*, 2007), herramienta para apoyo al planificador para tomar decisiones de asignación óptima para un campo agrícola para satisfacer necesidades de cultivos, reduciendo al mínimo los posibles impactos en las cuencas hidrográficas (De y Bezuglov, 2006), desarrollo de un sistema de soporte de decisiones basada en la web para apoyar gestión integrada de recursos hídricos en la ciudad de Daegu, Corea del Sur, en aspectos relacionados con demanda y asignación eficiente de agua urbana (Zeng *et al.*, 2012), DSS-web para la evaluación de riesgos de pesticidas para la contaminación de aguas superficiales, aguas subterráneas, suelo y aire (Zhang *et al.*, 2010).

De la revisión anterior, se puede establecer que existe un gran potencial de aplicación de los SSD desarrollados en Web para el apoyo a la toma de decisiones en aspectos relacionados con los recursos hídricos. Así mismo, debido a que no se encontró un SSD para la planeación de una cuenca hidrográfica, es necesario generar un SSD en Web con software de dominio público, para apoyar la toma de decisiones en la planeación de una cuenca hidrográfica, en la medida que estos presentan grandes ventajas sobre los tradicionales SSD, entre las que se destacan: evaluación de usuarios en línea, disponibilidad de conocimiento cruzando fronteras geográficas, culturales y estatus socio-económico, desarrollo de apoyos incorporados para explicación y justificación en línea, posibilidad de acuerdos involucrando expertos reales a través de las facilidades de Internet, usuarios finales realizan la computación vía Internet, recopilación de la retroalimentación de los usuarios y actualizaciones y mantenimiento controlados centralmente. Sin embargo, es necesario considerar los retos de las aplicaciones Web: soporte fuera de línea, cuando la base de usuarios crece en tamaño, velocidad de acceso, como hacer SBC locales disponibles fácilmente en Web, protección de propiedad intelectual y asuntos de seguridad, entre otros.

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se construyó un prototipo de un SSD con la técnica de los sistemas basados en conocimiento (SBC), operando en Web, utilizando cuatro principales componentes (Liao, 2005; Peña, 2006): base de conocimientos (BC), motor de inferencia, herramienta de inferencia e interface de usuario, a partir de la Figura 5.1. Cada componente con diversas funciones dentro del sistema: i) subsistema

adquisición de conocimiento: controla el flujo del conocimiento que fluye del proceso de gestión de conocimiento a la base de datos. ii) subsistema control de la coherencia: controla la consistencia de la base de datos y evita que unidades de conocimiento inconsistentes entren en la misma, iii) subsistema de ejecución de órdenes: da órdenes, es la componente que permite al sistema iniciar acciones. Estas acciones se basan en las conclusiones generadas por el motor de inferencia, iv) subsistema interface de usuario: es el enlace entre el sistema y el usuario.

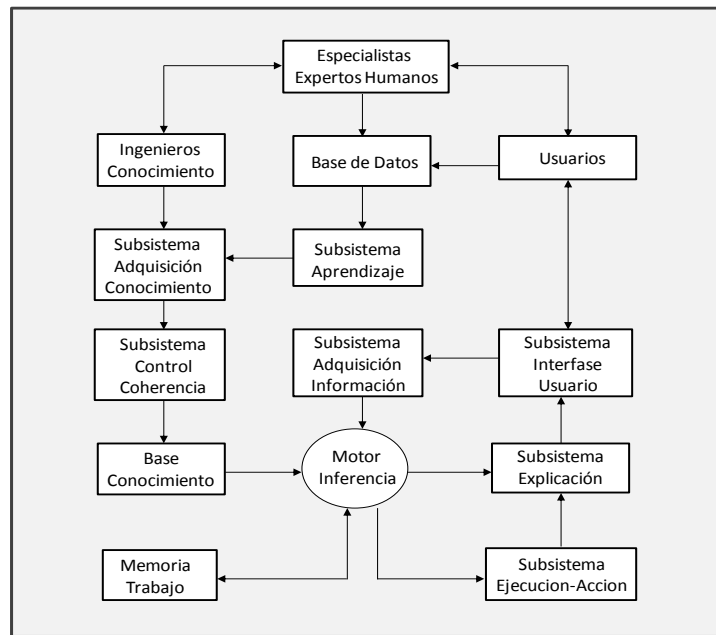


Figura 5.1 Esquema de la arquitectura de un sistema basado en conocimiento (Liao, 2005).

El prototipo SSD se denomina *cuencandina* y fue desarrollado utilizando una combinación de lenguajes de programación de código abierto: *Protgres*, *Java*, *Ajax-jQuery* y *jFuzzyLogic* (Rojas, 2011). El lenguaje *Java* es un lenguaje orientado a objetos, de libre distribución, presenta buena seguridad y optimización, evitando operaciones incoherentes en tiempo de compilación; permitiendo al compilador usar de forma eficiente las instrucciones a la máquina virtual y hace el código fuente más elegible. *Ajax* es una técnica que agrupa un conjunto de tecnologías que permiten diseñar aplicaciones Web, basadas en el concepto de Web 2.0. *jQuery* se seleccionó para el desarrollo de las interfaces gráficas, considerando que es un *framework* estable, bien documentado, en constante actualización y con una amplia comunidad de creadores de *plugins* o componentes, lo que facilita encontrar soluciones ya creadas (Rojas, 2011). *jFuzzyLogic*, es un motor de inferencia difusa, escrito en *Java*, de código abierto, está en constante actualización y soporte por sus autores, es fácil de usar, además implementa la especificación FCL (*Fuzzy Control Language*) que permite crear y evaluar bases de conocimiento (Rojas, 2011). *ProtgresSQL*, es una de las bases de datos más potentes y robustas, dentro de las características que tiene son: estabilidad,

potencia, facilidad de administración e implementación de estándares. Funciona muy bien con grandes cantidades de datos y alta concurrencia de usuarios accediendo a la vez al sistema (postgresql, 2013).

La metodología de desarrollo del SSD fue la Programación Extrema (XP: Extreme Programming), clasificada dentro de las metodologías ágiles de programación, fue introducida por Kent Beck en 2000, en la cual se hace énfasis sobre la adaptabilidad en proyectos cambiantes con requisitos imprecisos. Se usa principalmente en grupos de desarrollo pequeños en los cuales se promueve una buena comunicación y buen clima laboral. XP ofrece una lista simple y específica de procesos, valores y principios que son aconsejables para ser adoptadas en un proyecto de desarrollo de software. XP tiene cuatro fases para el desarrollo de software: planeación, codificación, diseño y prueba (Hneif y Hock Ow, 2009).

La arquitectura del prototipo computacional se desarrolló considerando cinco capas: interfaz de usuario, lógica, acceso a datos, entidades y herramientas, como se ilustra en la Figura 5.2. Cada capa se describe a continuación. Capa de interfaz de usuario: contiene los componentes que puede ver el usuario y con los cuales interactúa, dependiendo del rol que desempeñe en la aplicación tendrá acceso a ciertas funciones; integra los siguientes módulos: i) formularios y tablas de datos, que permite ingresar, ver, actualizar y eliminar información de la cuenca hidrográfica, ii) presentación de información, que despliega información retornada por la aplicación, en forma de gráficas, tablas, texto y demás recursos y iii) adquisición de conocimiento, el cual permite gestionar el conocimiento en la base de datos y la base de conocimiento. Esta capa se desarrolló usando la tecnología **JSP** para la generación de las interfaces gráficas de usuario y se usó *framework jQuery* que implementa la técnica de desarrollo Web Ajax. La comunicación de esta capa es bidireccional con la capa de lógica.

Capa de lógica: donde residen los procesos objetivos de la aplicación; recibe las peticiones de la capa de interfaz de usuario, solicita la información necesaria a la capa de acceso de datos, procesa los datos y envía la respuesta, también es la encargada de proveer servicios Web. Esta capa contiene dos componentes principales: motor de inferencia difusa, implementado usando la librería *IFuzzyLogic* y el componente de lógica de aplicación, el cual fue implementada usando *Java Servlets*.

Capa de acceso a datos: encargada de acceder a las fuentes de datos y realizar acciones de inserción, actualización, consulta y borrado de información, fue desarrollada usando el lenguaje *Java*, tanto para la información que se encuentre almacenada en la base de datos relacional como para otras fuentes de datos: archivos planos y servicios Web, entre otros. Capa de entidades: es un mapeo al lenguaje *Java* de las entidades de la base de datos. Esta capa es transversal a toda la aplicación. Capa de herramientas: proporciona clases útiles para el procesamiento de cadenas de texto, formatos de fechas, manejo de usuarios y sesiones, trazas y demás utilidades necesarias para desarrollar los procesos de lógica, al igual que la capa de entidades, esta capa es transversal a toda la aplicación.

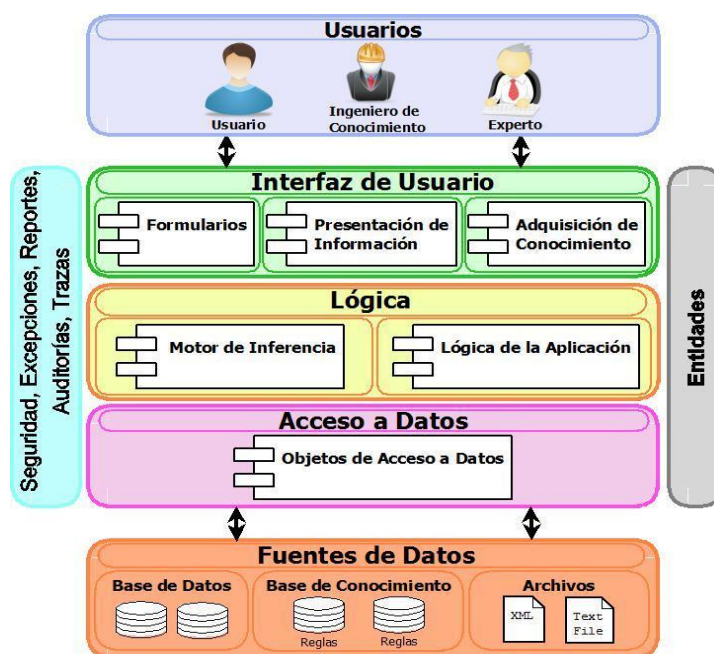


Figura 5.2 Esquema de la arquitectura del prototipo computacional *cuencandina* (Rojas, 2011).

El sistema SSD-BC-Web fue desarrollado para funcionar adecuadamente en el navegador *Firefox* de *Mozilla*, aunque también funciona con *Google Chrome*. Las ventajas de *Firefox* son: gran cantidad de extensiones y plug-ins, que son pequeños programas que amplían las funciones del navegador, cumple satisfactoriamente los estándares y reglas de desarrollo en Web y es multiplataforma, sirve para cualquier sistema operativo, diversos tipos de ordenadores pueden emplear el mismo navegador en todos ellos. Entre las desventajas de este navegador se encuentran: consume demasiada memoria. Si al navegar se abren muchas pestañas o ventanas el rendimiento es limitado, sin embargo algunas pestañas y vulnerabilidades pueden ser rápidamente corregidas.

1.20 5.4 RESULTADOS

5.4.1 Sistema soporte a la decisión basado en conocimiento en Web *cuencandina*

El prototipo SSD-BC-Web *cuencandina* se puede acceder desde la página Web <http://cuencandina.univalle.edu.co>, donde se presenta la pantalla que se ilustra en la Figura 5.3. El usuario debe acceder a través de la pestaña *ingresar*. Si el usuario no dispone de usuario y contraseña deberá solicitarlo a través del envío a los correos electrónicos vvargasf@unal.edu.co; viviana.vargas@correounivalle.edu.co. Posteriormente, podrá acceder al sistema *cuencandina*.

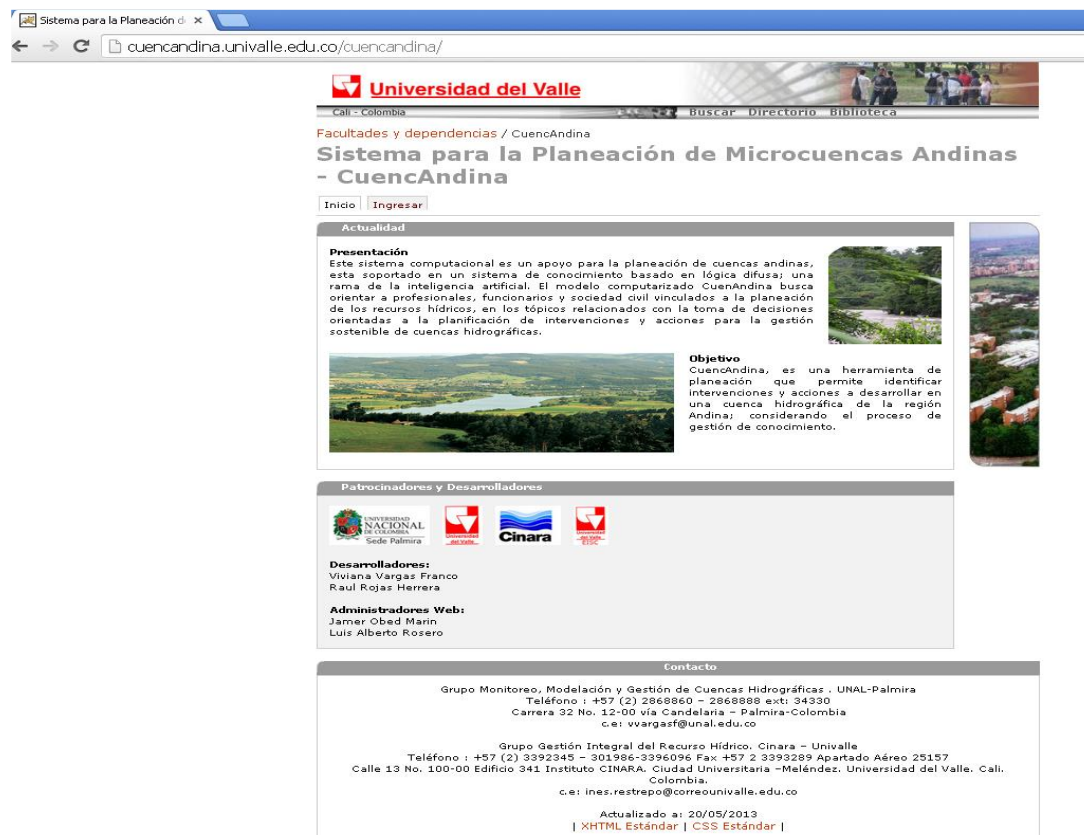


Figura 5.3 Interfaz de inicio al prototipo SSD-BC-Web *cuencandina*.

La pantalla de inicio cuenta con un banner en la parte superior, que contiene el título de la aplicación y su versión. El prototipo *cuencandina* tiene cuatro módulos principales: administrar cuencas, base de conocimiento, mi cuenta y administrador de usuarios, como se presenta en la figura 5.4. De acuerdo al perfil, cada usuario tendrá funciones específicas habilitadas



Figura 5.4 Interfaz de acceso a los módulos del SSD-BC-Web *cuencandina*.

5.4.2 Módulo administración de cuencas hidrográficas

El módulo de administración de cuencas permite almacenar la información de una o varias cuencas por un mismo usuario, aquí se agrupan las funcionalidades que se relacionan para la planeación de las cuencas hidrográficas. Este módulo cuenta con tres menús: cuenca, caracterización y generación de informes.

En el menú cuencas, el usuario debe diligenciar información general de la microcuenca andina para el apoyo a la toma de decisiones en el proceso de planeación. Entre la información requerida se encuentra: nombre de la microcuenca, ubicación en zona rural o urbana, país, departamento y municipio, como se ilustra en la Figura 5.5. Esta información quedará almacenada en la base de datos del sistema y estará disponible cada que el usuario ingrese a su cuenta. Cada interfaz de usuario, dentro del prototipo, tiene botones de ayuda que están ubicados en la parte inferior izquierda. Los botones tienen las siguientes funciones, en su orden: agregar nueva fila, modificar fila seleccionada, ver fila seleccionada, eliminar fila seleccionada y recargar datos.



The screenshot displays the 'Cuencas Andina' system interface. At the top, the title 'Sistema para la Planeación de Microcuencas Andinas Versión 1.0 Beta' is visible. On the left, a sidebar menu includes 'Administrar Cuencas' (expanded), 'Cuentas', 'Caracterizar', and 'Informes'. Below the menu are buttons for 'Base de Conocimiento', 'Mi Cuenta', and 'Administrar Usuarios'. The main content area, titled 'Administración de Cuencas', features a table with the following data:

Id	Nombre	Ubicación	Fech. Registro	Usuario Id	País	Departamento	Municipio
3	Cuenca Guadalajara	Zona rural y urbana de Bugá	18/09/2013	2	Colombia	Valle del Cauca	Alcalá
2	microcuenca andina el Chochi	Zona rural de Santiago de Cal	10/09/2013	2	Colombia	Valle del Cauca	Cali

Below the table, there are navigation controls including a pagination bar showing 'Página 1 de 1' and a dropdown menu set to '10'. The status 'Mostrando 1 - 2 de 2' is also present.

Figura5.5 Esquema del submenú cuencas del prototipo *cuencandina*.

En el menú caracterizar, se despliegan dos formularios generales, uno para identificar la microcuenca y otro para identificar tanto la zona de la microcuenca a caracterizar como el subsistema a evaluar. Para tal efecto, se debe seleccionar la cuenca y seleccionar la zona de la cuenca a caracterizar: zona alta, media o baja, cada una se caracteriza de manera independiente. Esto considerando que es posible que solo se requiera evaluar solo una zona o se tengan solo datos disponibles de la misma, como se presenta en la Figura 5.6. Una vez se han definido la cuenca y la zona a evaluar, se procede a ingresar los datos por cada uno de los subsistemas considerados en el modelo de conocimiento: subsistema bio-físico, socio-económico, político-institucional o tecnológico. Aquí se debe pulsar el botón “+”, al margen izquierdo de cada subsistema y se desplegara el formulario presentado en la Figura 5.7.

Sistema para la Planeación de Microcuencas Andinas Versión 1.0 Beta

Administrar Cuentas

- Cuentas
- Caracterizar**
- Informes

Base de Conocimiento

Mi Cuenta

Administrar Usuarios

Caracterización de Cuentas

Cuenta: Seleccione la Cuenca a Caracterizar: microcuenca andina el Chocho

Formulario de Caracterización de la Cuenca

Tema Principal ?

Zona de la Cuenca: Seleccione una opción ?

Subsistema Bio-Físico ?

Subsistema Tecnológico ?

Subsistema Político-Institucional ?

Subsistema Socio-Económico ?

Enviar **Limpiar**

Figura 5.6 Campos para selección de la cuenca, la zona y el subsistema a evaluar.

Sistema para la Planeación de Microcuencas Andinas Versión 1.0 Beta

Administrar Cuentas

- Cuentas
- Caracterizar**
- Informes

Base de Conocimiento

Mi Cuenta

Administrar Usuarios

Caracterización de Cuentas

Cuenta: Seleccione la Cuenca a Caracterizar: microcuenca andina el Chocho

Formulario de Caracterización de la Cuenca

Tema Principal ?

Zona de la Cuenca: Seleccione una opción ?

Subsistema Bio-Físico ?

Agua Residual: ?

Minería: Seleccione una opción ?

Erosión en la Zona: ?

Coliformes Fecales: ?

Agua Residual Tratada: ?

Estrategias de Minería Sostenible: Seleccione una opción ?

Planes de Reforestación y Restauración: Seleccione una opción ?

Ganadería Intensiva: ?

Uso de Fertilizantes y Pesticidas: ?

Manejo de Residuos Sólidos: Seleccione una opción ?

Contaminación del Suelo: ?

Programa para Prácticas de Conservación del Suelo: Seleccione una opción ?

Implementación Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos: ?

Medidas de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático: Seleccione una opción ?

Incremento de Emisiones de Dióxido de Carbono: ?

Variación de la Precipitación Anual: ?

Variación de la Temperatura Anual: ?

Ocurrencia de Eventos Naturales Extremos: Seleccione una opción ?

Inversión en Abatimiento de la Contaminación del Aire: Seleccione una opción ?

Demanda Química de Oxígeno: ?

Subsistema Tecnológico ?

Recurso para Planes de Monitoreo: ?

Investigación y Transferencia de Conocimiento: Seleccione una opción ?

Requerimientos de Datos e Información Ambiental: Seleccione una opción ?

Conocimiento Sistematizado: Seleccione una opción ?

Transferencia de Información y Conocimiento: Seleccione una opción ?

Disponibilidad de Datos, Información y Conocimiento: Seleccione una opción ?

Subsistema Político-Institucional ?

Conflicto por el Uso del Agua: Seleccione una opción ?

Comunicación y Participación Social: Seleccione una opción ?

Coordinación Institucional: Seleccione una opción ?

Grado de Participación Comunitaria: ?

Tasa de Crecimiento de la Población: ?

Consejo de Cuenca con Sistema Admin. Propio: Seleccione una opción ?

Conflicto por el Uso del Suelo: Seleccione una opción ?

Subsistema Socio-Económico ?

Actores Interesados en Educación y Cultura del Agua: ?

Programas de Educación y Cultura del Agua: Seleccione una opción ?

Recurso para Educación y Cultura del Agua: ?

Prácticas Inadecuadas del Uso del Agua: Seleccione una opción ?

Participación de la Sociedad Civil en Proyectos de Educac. y Cult. del Agua: Seleccione una opción ?

Capacitación en Uso Eficiente del Agua: Seleccione una opción ?

Enviar **Limpiar**

Figura 5.7 Formulario de entrada de datos y conocimiento al sistema cuencandina.

El formulario presenta los datos, información y conocimiento requeridos sobre los indicadores PER definidos en el capítulo 4 y que procesaran junto con las funciones y reglas de lógica difusa los seis índices definidos para la evaluación de una microcuenca andina.

El menú de informes genera reportes donde identifica el valor de cada uno de los seis índices definidos dentro del modelo, dependiendo del sub-sistema, así: subsistema bio-físico: índice de calidad de agua superficial (**ICASup**), índice de degradación del suelo (**IDS**) e índice de cambio climático (**ICC**). En el subsistema socio-económico: índice de educación y cultural del agua (**IEDCA**). En el subsistema político-institucional: índice de gobernanza del agua (**IGBA**) y en el subsistema tecnológico: índice de datos, información y conocimiento (**IDIC**). Estos índices se generan para cada zona de la microcuenca andina: zona alta, media y baja, generando en total el valor de 18 índices, como se presenta en la Figura 5.8. Una vez se seleccione alguno de los índices, aparecerá en la parte inferior de la pantalla las intervenciones recomendadas a corto, mediano y largo plazo, de acuerdo a cada valor de índice por cada zona de la microcuenca andina. De igual forma, es posible generar un archivo pdf con esta información.



Figura 5.8 Esquema general del sistema de administración de informes

5.4.3 Módulo base de conocimiento

En este módulo se agrupan cuatro menús relacionados con la gestión de la base de conocimiento: definición de variables, temas o subsistemas, reglas y recomendaciones o intervenciones. A este módulo no tienen acceso los usuarios de la aplicación, debido a que se maneja el conocimiento para la toma de decisiones. La definición de los temas está asociado a cada uno de los subsistemas definidos tanto en el capítulo 2, como en el capítulo 4, para la conceptualización del modelo *cuencandina*: bio-físico, político-

institucional, socio-económico y tecnológico, como se presenta en la Figura 5.9. Este menú cuenta con las opciones de añadir, editar y borrar temas, en esta medida se pueden complementar o modificar los subsistemas definidos.



Figura 5.9 Submenu de base de conocimiento para la administración de temas.

En el menú de variables, se definieron como variables cada uno de los indicadores PER considerados en el modelo de conocimiento presentado en el capítulo 4. La definición de variables se presenta en la parte baja de la interfaz de la Figura 5.10. En cada variable se definió un identificador, el nombre, un texto, una descripción, definición del tipo: salida o entrada, el método de defusificación, el rango de validez y el tema o subsistema al cual pertenece. Por su solides matemática, el método de defusificación, por defecto, en cada caso es el centro de gravedad. Sin embargo, es posible utilizar otros métodos de defusificación, tales como: criterio de máximo, media de máximo, máximo más mínimo, máximo más grande o bisector de área.

Los terminos lingüísticos de cada variable fuzzy se administran en la parte superior de la interfaz presentada en la Figura 5.11. Las funciones de pertenencia para cada variable se definieron en el capítulo 4. Para cada una de las variables se debe definir el rango que clasifica la función y el tipo de función definidas entre trapezoidal, triangular o singleton. Sin embargo, en el prototipo es posible definir otro tipo de funciones, tales como: por partes, gaussiana, coseno, diferencia sigmoidal, campana generalizada y sigmoidal. Una vez ingresada la variable, tipificada la función y definido el tipo de función, se activa la opción graficar y aparecerá la función de pertenencia de la variable analizada.

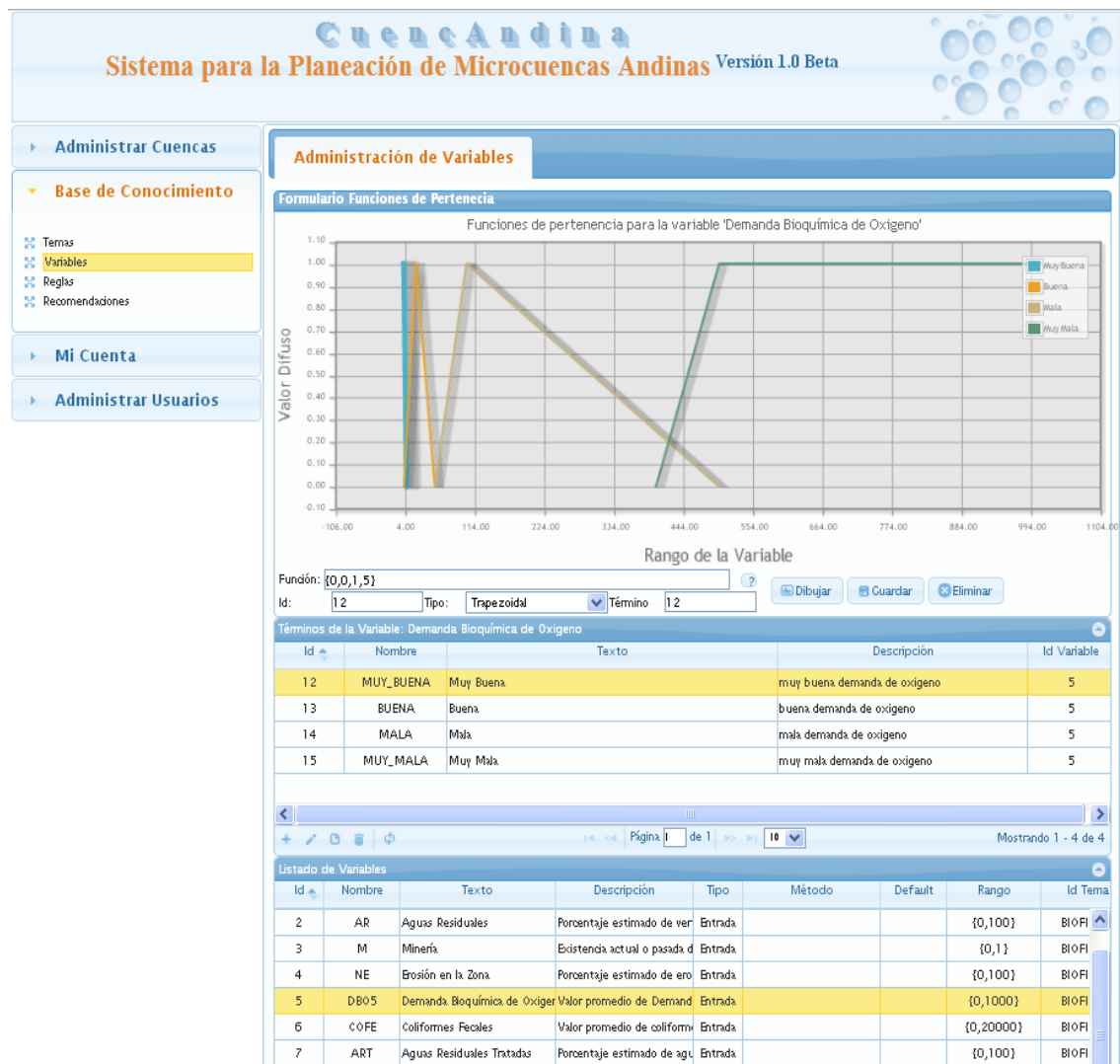


Figura 5.10 Formulario para definición de variables y funciones de pertenencia.

En el menú denominado administración de reglas se programaron las reglas de decisión definidas en el modelo de conocimiento del capítulo 4. En la parte superior se selecciona las variables de entrada, o denominadas antecedentes, y se construyen las reglas a través de los operadores lógicos IS, IS NOT, NOT, AND, u OR, para generar el valor de las variables de salida, o consecuentes, es decir, el valor de los índices. Cada índice tiene el mismo peso, pero en el prototipo es posible asignarle un peso específico a cada índice, como se ilustra en Figura 5.11. El prototipo *cuencandina* definió 1.101 reglas para la toma de decisiones en la planeación de una microcuenca andina. En el menú de recomendaciones, están las intervenciones sugeridas en el corto, mediano y largo plazo, de acuerdo a cada uno de los valores de los índices obtenidos para la zona alta, media y baja de la cuenca hidrográfica. Estas intervenciones pueden ser modificadas de acuerdo a nuevo conocimiento.

Figura 5.11 Esquema del formulario para la definición y administración de reglas de decisión.

5.4.4 Módulo mi cuenta

En el menú *mi cuenta* se agrupa las funciones de administración de datos y modificación de contraseña para cada uno de los usuarios sistema *cuencandina*, permite la actualización de datos del usuario y la opción guardar los datos. Para la creación de un usuario se requiere la información de los siguientes campos: identificación, nombre, teléfono, celular, e-mail, dirección, fecha de ingreso, país, departamento, municipio, rol del usuario y estado (activo o no activo). El usuario tiene la opción de actualizar sus datos y cambiar su contraseña. También, por este menú tiene la opción de cerrar la sesión de trabajo. En este menú, el usuario puede cambiar los colores de los objetos en la pantalla al seleccionar la opción “Tema:Redmond” y seleccionar alguno de los calendarios que aparecen en la lista. Estos calendarios son una vista previa de los colores que tiene cada usuario y puede cambiar.

5.4.5 Módulo administración de usuarios

En este menú se agrupan las siguientes funcionalidades: usuarios, componentes y autorización. En usuarios permite crear, modificar y eliminar usuarios. En componentes se despliegan cada uno de los menús y submenús que contiene el prototipo y en autorización permite asignar permisos sobre cada uno de los componentes del sistema a cada uno de los usuarios. Los componentes serán registrados por el desarrollador, quien tiene conocimiento de cada componente y le asignara un identificador que permita su visualización. Al seleccionar un usuario y darle restaurar contraseña, permitirá regresarle la contraseña por defecto, al ingresar al sistema, el usuario podrá actualizar su contraseña e ingresar una personalizada.

5.5 DISCUSIÓN

En la sociedad de la información y el conocimiento las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC's) juegan un papel fundamental, pues no sólo se sitúan como uno de los principales motores de innovación y competitividad, sino también como la base tecnológica para sustentar la gestión eficiente de los recursos naturales disponibles, generar estrategias para la mitigación y adaptación al cambio climático, promover cambio en los hábitos de la sociedad y gestionar los recursos hídricos, entre otros.

Considerando lo anterior, en este capítulo se construyó un prototipo de un sistema soporte a las decisiones basado en conocimiento y lógica difusa, estas dos últimas herramientas consideradas dentro de las técnicas de la inteligencia artificial. El sistema se desarrolló con software de dominio público operando en Web y se denominó *cuencandina*. Para la construcción del prototipo del sistema se consideró la conceptualización del modelo de conocimiento, los indicadores PER y los modelos de lógica difusa desarrollados en el capítulo 4, que fueron conceptualizados para la planeación de una microcuenca andina. En este sentido el sistema puede denominarse prototipo SSD-BC-Web *cuencandina*: sistema soporte a la decisión basado en conocimiento operando en Web. El prototipo fue diseñado para operar por medio de módulos los cuales pueden ser fácilmente modificados y actualizados sin requerir ingresar al código de programación.

Contrario a la mayoría de SSD desarrollados para la gestión del agua, el prototipo SSD-BC-Web *cuencandina* considera la microcuenca andina, como un sistema complejo integrado por múltiples subsistemas. La mayoría de SSD han sido desarrollados para la evaluación de aspectos puntuales y en general concentrados en aspectos bio-físicos de una cuenca hidrográfica, es el caso de los estudios de (Lautenbach *et al.*, 2009), que genero un SSD para estudiar la concentración y emisión de nutrientes (nitrógeno y fosforo), (Makropoulos *et al.*, 2008), que generó un SSD para el manejo del agua a nivel urbano, considerando abastecimiento de agua, disposición de aguas residuales y drenaje de agua lluvia y (Le Bars y Le Grusse, 2008), que genero un SSD para apoyar a usuarios afectados por escasez de agua.

De igual forma, el prototipo SSD-BC-Web *cuencandina* ha sido conceptualizada como una herramienta de gestión, diseño, implementación y evaluación de la política y por lo tanto no requiere

personal experto para operarlo ni para interpretar las salidas del sistema como ocurre con la mayoría de SSD y modelos de simulación, desarrollados para la gestión de los recursos hídricos. Similarmente, no requiere series de datos históricas de parámetros de calidad de agua, pues no opera con modelos de simulación. Los procesos que utiliza con las funciones de lógica difusa son internos y no se requiere dominio de estas técnicas para su uso.

Otra gran funcionalidad del prototipo de sistema computacional es que está desarrollado con software de dominio público y opera en Web, contrario a muchas de las herramientas de modelado de cuencas que están disponibles para entornos UNIX y Windows (Shen *et al.*, 2005). Pocos desarrollos de SSD se han desarrollado en Web y aquellos están focalizados en aspectos puntuales de la gestión de los recursos hídricos como es el caso de Zeng (2012), que desarrolló de un SSD-Web para apoyar gestión integrada de recursos hídricos en la ciudad de Daegu, Corea del Sur, en aspectos relacionados con demanda y asignación eficiente de agua urbana y Zhan (2012), que desarrolló un DSS-web para la evaluación de riesgos de pesticidas en la contaminación de aguas superficiales, aguas subterráneas, suelo y aire.

El prototipo SSD-BC-Web *cuencandina* es un sistema diseñado para ser una herramienta de gestión, diseño, implementación, evaluación de política y apoyo a la toma de decisiones en la planeación de microcuencas andinas, ha sido desarrollado para usar sin licencia, está disponible en Web, es flexible, amigable, fácil de operar y genera información rápida y oportuna, para diversos actores de una cuenca hidrográfica. Genera una serie de intervenciones a desarrollar para alcanzar una sostenibilidad de una microcuenca andina y permite hacer a las intervenciones recomendadas, puede ser aplicado a una sola zona de una microcuenca: zona alta, media o baja o utilizarse para analizar el valor de un índice de forma individual. La información de cada microcuenca evaluada permanecerá disponible en el prototipo Web, para cada usuario de la aplicación.

La consolidación y puesta en funcionamiento del prototipo Web *cuencandina*, permitirá su aplicación para la elaboración de planes de manejo de microcuencas en el país, así como promover el uso de conocimiento para la toma de decisiones y podría convertirse en una herramienta fundamental para el apoyo a la elaboración de planes para la gestión integrada de los recursos hídricos en microcuencas andinas. Lo anterior, considerando que en Colombia el 96% (714.311) de las cuencas hidrográficas corresponden a microcuencas (IDEAM, 2007; MAVDT, 2010b) las cuales no poseen planes de manejo.

El prototipo SSD-BC-Web *cuencandina* podrá ser utilizado por diversos actores en una microcuenca andina y diversas instituciones en el país, entre las que se destacan: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, específicamente el Grupo de Gestión Integrada de Recursos Hídricos, Ministerio de Agricultura, Corporaciones Autónomas Regionales (CAR's), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y juntas administradoras de acueductos rurales localizadas en microcuencas andinas, entre otros. Así mismo, se podrá utilizar en las Universidades como una estrategia

de gestión del conocimiento alrededor de la planeación de cuencas hidrográficas. El prototipo Web está diseñado específicamente para ser aplicado a las microcuencas andinas de la región colombiana, sin embargo su marco de acción puede extenderse a microcuencas andinas tropicales de países como Perú, Venezuela y Ecuador, entre otros. De igual forma, podría evaluarse su desempeño en escalas más grandes de una cuenca hidrográfica.

Este sistema podrá contribuir en organizar, resumir y sistematizar el conocimiento asociado a la planeación de cuencas hidrográficas y podrá contribuir en los procesos de compartir, difundir, distribuir y utilizar este conocimiento, considerando que los SBC son simultáneamente, un sistema de ejecución y un sistema de transmisión del conocimiento. Los SBC son una herramienta poderosa y flexible para apoyo a las decisiones en una gran variedad de problemas que frecuentemente no pueden ser resueltos por métodos más tradicionales u ortodoxos, por lo tanto su uso está proliferando en muchos sectores técnicos y sociales (Liao, 2005). Sin embargo, es necesario considerar los retos en los procesos de adquisición y representación del conocimiento, colaboración y consecución de expertos, programación, validación y verificación, entre otros, adicionalmente en Web, se deben abordar aspectos relacionados con el diseño, construcción y mantenimiento (Dokas, 2005).

Un SSD podría reducir los costos de transacción de las decisiones por los diversos usuarios e instituciones relacionadas con la gestión integrada de los recursos hídricos en la planeación de cuencas hidrográficas, en este sentido se pueden evaluar los costos de elaboración de un plan de gestión de una microcuenca y los costos con el uso del prototipo SSD-BC-Web *cuencandina*. En este capítulo se desarrollaron las cinco primeras etapas de desarrollo de un proyecto de un sistema computacional: definición de objetivos, selección del modelo, integración del modelo, diseño y desarrollo de una interface gráfica de usuarios e implementación. Por lo cual es necesario desarrollar las etapas de puesta en uso, mantenimiento y evaluación, considerando diversos casos de aplicación y diversos perfiles de potenciales usuarios.

5.6 CONCLUSIONES

Un nuevo prototipo de un sistema de apoyo a las decisiones basado en conocimiento se ha desarrollado para el apoyo en la planeación de microcuencas andinas. El prototipo denominado SSD-BC-Web *cuencandina* es un sistema diseñado para ser una herramienta de gestión, diseño, implementación, evaluación de política y apoyo a la toma de decisiones en la planeación de microcuencas andinas. El prototipo ha sido desarrollado para usar sin licencia, en Web, es flexible, amigable, fácil de operar y genera información rápida y oportuna, para diversos actores de una cuenca hidrográfica.

El prototipo SSD-BC-Web *cuencandina*, se diseñó y codificó utilizando una combinación de lenguajes de programación de código abierto. El prototipo apoya la toma de decisiones a través de la estimación del valor de seis índices que evalúan la sostenibilidad de una microcuenca andina. Los índices se basan en indicadores PER, lógica difusa y gestión de conocimiento. Además, genera intervenciones en la cuenca alta,

media y baja de la microcuenca considerando la variación temporal de las acciones, en el corto, mediano y largo plazo. Una de las ventajas de este SBC es que es una herramienta funcional para apoyar el proceso de gestión de conocimiento, el cual incluye las etapas de recolección, organización, sistematización y transferencia de conocimiento.

Considerando que el desarrollo de un sistema computacional es un proceso que requiere diversas etapas, en este capítulo se desarrollaron las siguientes etapas del prototipo Web: análisis de requerimientos, especificación, diseño y arquitectura y codificación. Por lo cual, es necesario seguir consolidando este prototipo a través de las etapas de pruebas, ajustes y mantenimiento, a través del uso con diversos actores y con información de diversas microcuencas andinas.

6. APLICACIÓN DEL PROTOTIPO CUENCANDINA EN LA MICROCUENCA ANDINA EL CHOCHO. VALLE DEL CAUCA. COLOMBIA

6.1 INTRODUCCIÓN

La situación de los recursos hídricos en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, es muy crítica. Esta región cuenta con 1.385 microcuencas y muy pocas con planes de ordenación o de recuperación. Considerando lo anterior, en este capítulo se aplicó el sistema de apoyo a las decisiones *cuencandina* a la microcuenca andina de la quebrada el Chocho, ubicada en la zona rural del municipio de Santiago de Cali. A partir de información primaria y secundaria, se compiló la información requerida para operar el SSD *cuencandina*. Se generaron los valores de los seis índices y las intervenciones recomendadas para la gestión sostenible de la microcuenca, considerando acciones de corto, mediano y largo plazo las zonas alta, media y baja de la microcuenca. Se concluye que la aplicación del SSD *cuencandina*, representa una situación acorde a la realidad socio-ambiental de la microcuenca. Las intervenciones recomendadas por el SSD coinciden con las generadas en otros estudios, además propone nuevas intervenciones para alcanzar una sostenibilidad socio-ambiental en la microcuenca.

6.2 MATERIALES Y MÉTODOS

6.2.1 Zona de estudio

Para aplicar el prototipo SSD *cuencandina* se seleccionó la microcuenca andina de la quebrada el Chocho, que nace en la Cordillera Occidental de los Andes, ubicada en su totalidad en el área rural de la ciudad de Cali, en el Departamento del Valle del Cauca, como se presenta en la Figura 6.1. Esta microcuenca es considerada un ecosistema estratégico por su importancia ecológica y ambiental para el abastecimiento de agua de diversos usos: domésticos, recreativos, productivos y de reserva natural, entre otros (Marín, 2004). A pesar de esto, esta microcuenca cuenta con pocos estudios de planeación.

La microcuenca el Chocho nace en el predio el Vergel del Corregimiento la Paz, en la Cordillera Occidental de los Andes, a una altura aproximada de 2.000 msnm., tiene una extensión total de 21,3 km² y una longitud de 10 km., donde recibe tributo de las quebradas: Bellavista, El Suspiro y El Papa, por el margen derecho y las quebradas La Rusia, las Tomasas y El Moral por su margen izquierdo (Marín, 2004). En su área de influencia posee porciones de terreno de los corregimientos: La Castilla (50%), La Paz (18%), Golondrinas (13%) y Montebello (19%). La microcuenca abastece a 8 acueductos de la zona para la provisión de agua a 15.000 habitantes, para uso doméstico y productivo (Domínguez y Corrales, 2006; Marín, 2004).

6.2.2 Aplicación del SSD *cuencandina*

Para la aplicación del SDD *cuencandina* se realizó una caracterización de los principales problemas en la microcuenca y se recolectaron datos, información y conocimiento requeridos para operar cada uno de los índices definidos en el prototipo computacional. La información correspondió a información primaria y secundaria. La primera consistió en la realización de 5 visitas y entrevistas a diversos actores de la microcuenca: operador y administrador de la planta de tratamiento de agua potable, operarios de minerías y miembros de las juntas comunales. Así mismo, se realizó un registro fotográfico de los principales problemas de la microcuenca. La información secundaria se obtuvo de la revisión de trabajos de grado a nivel de pregrado y maestría y proyectos de investigación y desarrollo realizados en esta microcuenca.

A partir de los datos, información y conocimiento de la microcuenca el Chocho, se diligenció el formato de indicadores PER definido en el capítulo 4, para operar el modelo de conocimiento *cuencandina*. Una vez se obtuvo el formulario se procedió a registrar la información general de la microcuenca correspondiente a la pantalla inicial del prototipo *cuencandina*. Posteriormente, se ingresó la información de los diversos indicadores presión-estado-respuesta (PER), con el fin de obtener la valoración de cada uno de los seis índices definidos en el modelo de conocimiento, en cada una de las zonas de la microcuenca:

- ICAsup: Índice de Presión, Estado, Respuesta (PER) de calidad de agua superficial.
- IDS: Índice de Presión, Estado, Respuesta (PER) de degradación del suelo.
- ICC: Índice de Presión, Estado, Respuesta (PER) de cambio climático.
- IGBA: Índice de Presión, Estado, Respuesta (PER) de gobernanza del agua.
- IEDCA: Índice de Presión, Estado, Respuesta (PER) de educación y cultura del agua.
- IDIC: Índice de Presión, Estado, Respuesta (PER) de datos, información y conocimiento.

Se obtuvieron los 18 índices, correspondientes a cada una de las zonas de la microcuenca el Chocho, los cuales fueron contrastados con la situación socio-ambiental actual de la microcuenca. De igual forma, el prototipo computacional generó las intervenciones recomendadas en el corto, mediano y largo plazo para la zona alta, media y baja de la microcuenca andina el Chocho. Estas intervenciones fueron contrastadas y evaluadas con las generadas en otros estudios realizados en la microcuenca.

1.21 6.3 RESULTADOS

6.3.1 Principales problemas en la microcuenca andina el Chocho

La microcuenca el Chocho se ha visto afectada desde el punto de vista ambiental por el cambio de uso de suelo, el incremento de población en asentamientos subnormales, el vertimiento de aguas residuales e industriales y el mal manejo de residuos sólidos, lo cual constituye una amenaza para la reserva forestal

protectora y para la calidad del agua (DAGMA, 2006; Domínguez y Corrales, 2006). Dentro de las industrias ubicadas en la microcuenca está la minería del carbón, tanto legal como ilegal, de la cual sólo unas pocas está legalizada ante la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC (UNIVALLE, 2009), afectando la calidad de agua, en parámetros como oxígeno disuelto, hierro, cobre, sulfatos y turbidez, en especial en los corregimientos de Montebello y Golondrinas donde se realiza explotación minera (CVC, 2011a; Domínguez y Corrales, 2006).

El nivel de erosión en cada zona de la microcuenca se presenta en la Figura 6.2, donde se observa que las regiones que presentan erosión severa, están ubicadas en la parte media y baja de la microcuenca, situación asociada a la elevada construcción de viviendas de manera no planeada, desarrollo de actividad minera, sin la aplicación de criterios ambientales, aportando gran cantidad de sedimentos a la quebrada el Chocho (Domínguez y Corrales, 2006). Adicionalmente, los grados de erosión en estas áreas hacen mayor el riesgo de avalanchas e inundaciones (Domínguez y Corrales, 2006).



Figura 6.2 Nivel de erosión en la microcuenca el Chocho (Domínguez y Corrales, 2006)

Un alto porcentaje de las aguas de la quebrada el Chocho abastece acueductos rurales que llevan agua a varias comunidades, donde existe una gran presión sobre la fuente, uso ineficiente del agua por los diversos actores y no existe caudal ecológico. La Quebrada El Chocho con alta demanda hídrica y baja disponibilidad superficial; se considera una de las microcuencas más secas de la región (CVC, 2011a), debido a que está desprovista de vegetación arbórea suficiente, lo que contribuye adicionalmente a que los pastizales de la microcuenca sufran de incendios, y exista poca cantidad de especies vegetales (DAGMA, 2006).

Los residuos líquidos de las minas de carbón, aumentan la acidez y la concentración de hierro; estos drenajes arrastran metales pesados en concentraciones que sobrepasan en considerable magnitud los niveles de seguridad fijados por organismos nacionales e internacionales. En los asentamientos de la microcuenca no existen plantas de tratamiento de aguas residuales, de tal forma que ya sea mediante solución individual o colectiva de saneamiento, las aguas residuales crudas son vertidas a la quebrada sin tratamiento previo (Domínguez y Corrales, 2006).

Diversos conflictos por el uso del suelo y el agua se presentan en la microcuenca por diferentes procesos: incumplimiento de reglamentación de corrientes, usuarios no oficiales, distribución inequitativa, desconocimiento de los usos múltiples del agua, pastoreo de ganado, deforestación, actividad minera insostenible, indiferencia de las instituciones, indiferencia comunitaria, manejo inadecuado de aguas residuales y falta de valoración económica del recurso. En esta microcuenca existen grandes conflictos por el uso del suelo, pues existe un cambio de vocación del suelo, al pasar de zona de amortiguamiento y reserva forestal, a minería y ganadería intensiva. Un registro fotográfico de algunas de estas situaciones se presenta en la Figura 6.3 y en la Tabla 6.1 se clasifican los problemas de acuerdo a los cuatro subsistema analizados en el capítulo 4.

La microcuenca el Chocho viene sufriendo un gran deterioro ambiental como consecuencia del cambio de vocación del uso del suelo, crecimiento poblacional, vertimiento de aguas residuales domésticas sin tratamiento, deficiente manejo de residuos sólidos y vertimiento de aguas ácidas de la minería del carbón. Estas circunstancias son fuentes de conflictos de diverso orden y magnitud, originados fundamentalmente por el acceso al agua, por los usos inadecuados del agua y por el desarrollo de prácticas que indirectamente inciden sobre la calidad y cantidad del recurso.

En medio de estas situaciones aparecen las instituciones, quienes por acción u omisión contribuyen a agudizar estos conflictos y la comunidad, quien ha tenido que fortalecer su capacidad de gestión para afrontar los retos que para ellos representa acceder a un recurso limitado y con tan elevada demanda. Sin embargo, el trabajo comunitario es aun débil, no está organizado ni articulado a los procesos de toma de decisiones en la microcuenca. No se cuenta con un documento de planeación que guíe el desarrollo socio-ambiental y no existe un comité de gestión de la microcuenca.



Figura 6.3 Registro fotográfico de los principales problemas de la microcuenca el Chocho.

6.3.2 Resultados de la aplicación del prototipo *cuencandina*

Considerando la caracterización de la microcuenca el Chocho y la identificación de sus principales problemas se diligenció el formato para ser implementado en el prototipo computacional *cuencandina*. En el Anexo 6.1 se presenta el formulario diligenciado con los datos de esta microcuenca y en la Figura 6.4 el formato de entrada de datos en el sistema de apoyo a las decisiones *cuencandina*, para la zona alta. De manera similar, se digitó la información para la zona media y baja de la microcuenca andina el Chocho.

Tabla 6. 1 Principales problemas por subsistemas en la microcuenca andina el Chocho.

Subsistema	Principales problemas en la microcuenca
Bio-físico	• Contaminación por vertimiento de aguas residuales domésticas, industriales, agropecuarias y de minería, sin previo tratamiento. • Contaminación por vertimiento de residuos sólidos mineros y domésticos al cauce principal. • Existen vertimientos de caparrosa y de metales pesados derivados de la minería en los cuerpos de agua sin previo tratamiento. • Saneamiento básico deficiente, ausencia de alcantarillado parcial o totalmente. • Grave proceso de deforestación por actividad minera y ganadera. • Deterioro y pérdida progresiva de ecosistemas estratégicos. • Acelerados procesos erosivos en diferentes zonas de la cuenca. • Disminución de la calidad del paisaje. • Frecuentes incendios forestales. • Poca oferta natural de recursos hídricos. • Algunos tramos de la microcuenca sin caudal ecológico. • Baja capacidad de resiliencia de la microcuenca.
Aire	• Quemadas de residuos sólidos a cielo abierto. • Minería a cielo abierto. • Deforestación y erosión. • Ausencia de monitoreo de la contaminación del aire. • Ausencia de planes para mitigación y adaptación al cambio climático.
Social	• Crecimiento acelerado poblacional en algunas zonas de la microcuenca. • Incremento de la ganadería. • Cambio de uso del suelo de su vocación original. • No existe una cultura del agua. • Existen conflictos por el uso del agua, el uso actual no corresponde con el uso potencial. • Existen conflictos por el uso del suelo, el uso actual no corresponde con la vocación del suelo. Pastoreo y agricultura en zonas de vocación forestal. • No existen procesos de planeación para el manejo integral de los recursos hídricos. • No se hace una adecuada aplicación de la legislación con relación a las medidas protectoras de la cuenca hidrográfica. • Ausencia de control de las instituciones y organizaciones estatales, para el uso y control de la contaminación del agua. • Ausencia de programas de uso eficiente del agua, cultura del agua y educación ambiental. • Ausencia de comité de gestión de la microcuenca. • Uso irracional del recurso hídrico. Elevada demanda del recurso. • Desbalance entre oferta y demanda del recurso hídrico. • Ausencia de líderes para la gestión y protección de la microcuenca. • Poca regulación y control del recurso hídrico en cuanto a la asignación de caudales. • No existen mecanismos y pagos por servicios ambientales.
Tecnológico	• Practicas inadecuadas en el uso del suelo y el agua en actividades de pastoreo. • Practicas inadecuadas en el uso del suelo y el agua en actividades agrícolas. • Practicas inadecuadas en el uso del suelo y el agua en actividades mineras. • Poco cumplimiento de la reglamentación de corrientes hídricas. • No existen planes de monitoreo social y ecoambiental en la microcuenca. • No existe sistematización y seguimiento de los problemas en la microcuenca. • La información y datos de la microcuenca por varias organizaciones es escasa y contradictoria. • Inadecuado manejo de residuos sólidos.

Sistema para la Planeación de Microcuencas Andinas Versión 1.0 Beta

▼ Administrar Cuencas

- ⚙ Cuentos
- ⚙ Caracterizar
- 📄 Informes

► Base de Conocimiento

► Mi Cuenta

► Administrar Usuarios

Caracterización de Cuencas

Cuenca

Seleccione la Cuenca a Caracterizar: microcuenca andina el Chocho

Formulario de Caracterización de la Cuenca

➤ **Tema Principal** ?

Zona de la Cuenca: Alta ?

➤ **Subsistema Bio-Físico** ?

Aguas Residuales: 90 ?

Mining: Si ?

Erosión en la Zona: 50 ?

Coliformes Fecales: 1000 ?

Aguas Residuales Tratadas: 0 ?

Estrategias de Minería Sostenible: No ?

Planes de Reforestación y Restauración: No ?

Ganadería Intensiva: 70 ?

Uso de Fertilizantes y Pesticidas: 50 ?

Manejo de Residuos Sólidos: Indecuido ?

Contaminación del Suelo: 30 ?

Programa para Prácticas de Conservación del Suelo: No ?

Implementación Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos: 0 ?

Medidas de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático: No ?

Incremento de Emisiones de Dóxido de Carbono: 60 ?

Variación de la Precipitación Anual: 40 ?

Variación de la Temperatura Anual: 0.3 ?

Ocurrencia de Eventos Naturales Extremos: Medio ?

Inversión en Abatimiento de la Contaminación del Aire: No ?

Demanda Química de Oxígeno: 1630 ?

➤ **Subsistema Tecnológico** ?

Recurso para Planes de Monitoreo: 0 ?

Investigación y Transferencia de Conocimiento: Bajo ?

Requisimientos de Datos e Información Ambiental: Alto ?

Conocimiento Sistematizado: Bajo ?

Transferencia de Información y Conocimiento: No ?

Disponibilidad de Datos, Información y Conocimiento: Bajo ?

➤ **Subsistema Político-Institucional** ?

Conflicto por el Uso del Agua: Alto ?

Comunicación y Participación Social: Bajo ?

Coordinación Institucional: Bajo ?

Grado de Participación Comunitaria: 20 ?

Tasa de Crecimiento de la Población: 0.03 ?

Consejo de Cuenca con Sistema Admin. Propio: No ?

Conflicto por el Uso del Suelo: Bajo ?

➤ **Subsistema Socio-Económico** ?

Actores Interesados en Educación y Cultura del Agua: 10 ?

Programas de Educación y Cultura del Agua: No ?

Recurso para Educación y Cultura del Agua: 0 ?

Prácticas Inadecuadas del Uso del Agua: Alto ?

Participación de la Sociedad Civil en Proyecto de Educac. y Cult. del Agua: Bajo ?

Capacitación en Uso Eficiente del Agua: Bajo ?

Enviar
Limpiar

Figura 6.4 Ingreso de datos de la microcuenca el Chocho *cuencandina*, para la zona alta.

Una vez diligenciada la información se pueden visualizar el valor de los diferentes índices contenidos en el prototipo, a través del menú informes. Por ejemplo, para la zona alta de la microcuenca, se presentan los resultados del índice ICASup en la Figura 6.5 y los resultados del índice IDS en la Figura 6.6.

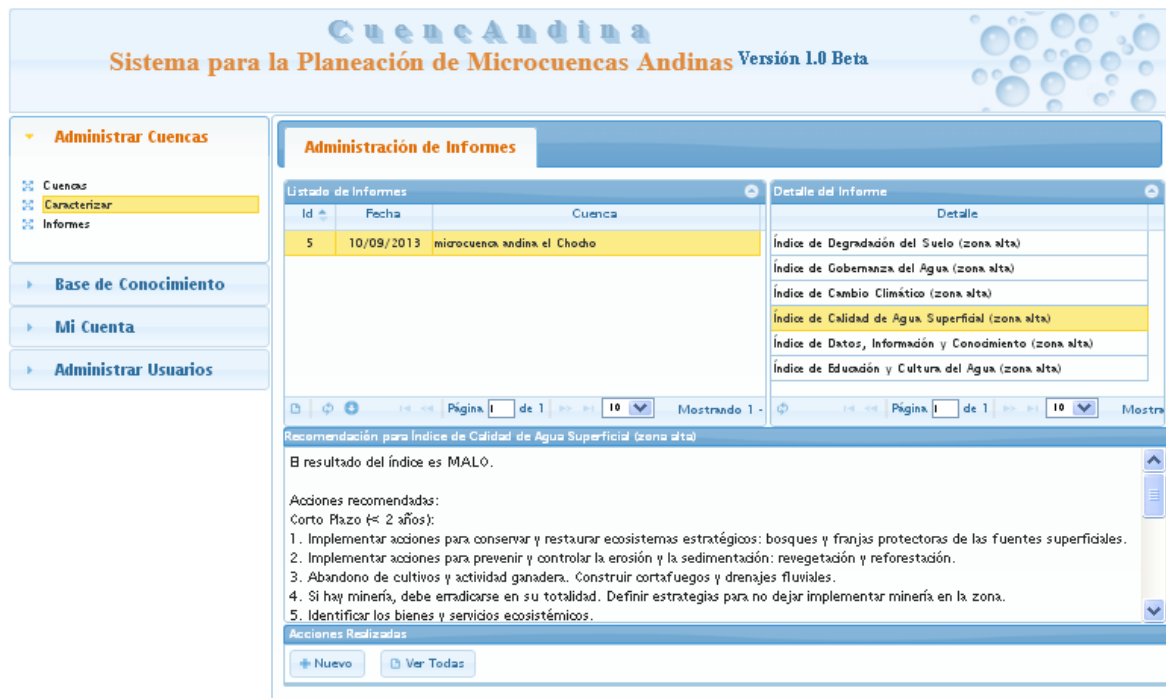


Figura 6.5 Valores del índice ICASup para la zona alta de la microcuenca el Chocho.



Figura 6.6 Valores del índice IDS para la zona alta de la microcuenca el Chocho.

De manera similar, se obtuvieron los valores de los 18 índices, seis por cada zona, evaluados en el modelo de apoyo a la decisión basado en conocimiento, *cuencandina*. En la Tabla 6.2, se resume el valor de los índices por cada zona.

Tabla 6. 2 Resumen del valor de los índices evaluados en la microcuenca el Chocho.

No.	Índice	Valor del índice por zona de la microcuenca		
		Alta	Media	Baja
1	ICASu	Malo	Malo	Malo
2	IDS	Malo	Malo	Malo
3	ICC	Malo	Regular	Malo
4	IGBA	Malo	Malo	Malo
5	IEDCA	Malo	Malo	Malo
6	IDIC	Malo	Malo	Malo

A partir de la información anterior, el valor de los índices se puede graficar en un diagrama radial para visualizar el estado de la microcuenca en cada zona evaluada, como se presenta en la Figura 6.7. Como se puede observar la situación socio-ambiental de la microcuenca el Chocho es crítica, tanto en la parte alta, como la media y la baja.

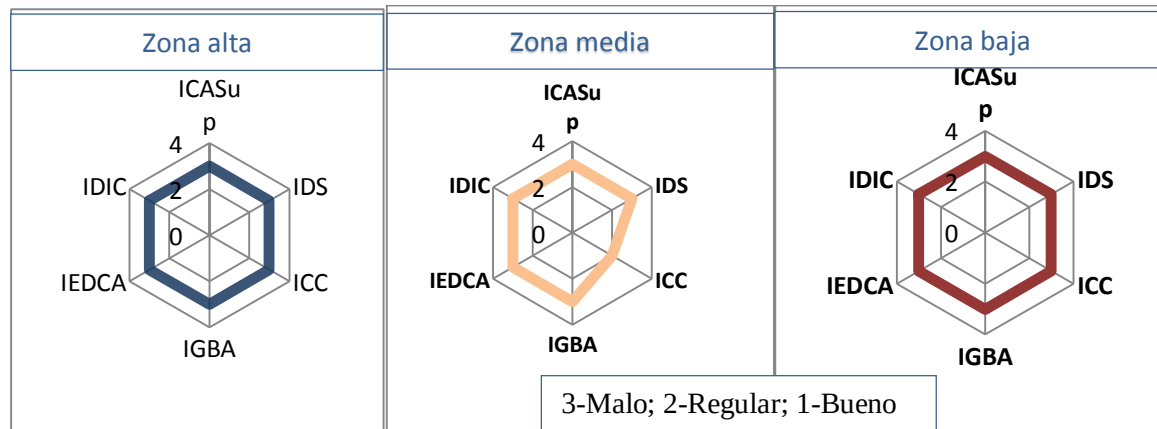


Figura 6.7 Valores de los 6 índices evaluados en la microcuenca baja.

Considerando los valores de los seis índices evaluados, el prototipo del sistema computacional genera las intervenciones recomendadas para ser implementadas, con el fin de acercarse a condiciones de sostenibilidad de la microcuenca andina. Un ejemplo de la salida se presenta en la Figura 6.8. A partir de estos reportes se pueden generar tablas resumen con las intervenciones recomendadas para la zona alta, media y baja, considerando acciones de corto, mediano y largo plazo. Como ejemplo, se presenta en la Tabla 6.3, las intervenciones recomendadas de acuerdo a los valores del índice de calidad de agua superficial

(ICASup) para la zona alta de la microcuenca y en la Tabla 6.4 se presentan las intervenciones de acuerdo a los valores del índice de cambio climático (ICC). De igual forma, se pueden realizar para los otros índices contemplados en el prototipo computacional y para las diversas zonas de la microcuenca.



microcuenca andina el Chocho
Informe generado el: martes 10 de septiembre de 2013

Resultados

Índice de Degradación del Suelo (zona alta)

El resultado del índice es MALO.

Acciones recomendadas:

Corto Plazo (< 2 años):

1. Debe erradicarse la ganadería y agricultura intensiva en la parte alta de la cuenca.
2. Definir estrategias de reforestación, identificando especies potenciales para rehabilitación.
3. Debe evitarse la urbanización en la zona.

Mediano Plazo (2 y 5 años):

1. Implementar estrategias para restaurar los suelos afectados por ganadería y agricultura intensiva
2. Implementar los procesos de reforestación con participación comunitaria.
3. Políticas y trabajo con instituciones regionales y nacionales para evitar urbanización en la zona

Largo Plazo (> 5 años):

1. Evaluar las estrategias de restauración de suelos
2. Evaluar los procesos de reforestación
3. Evaluación de políticas y trabajo con instituciones para evitar urbanización en la zona

Índice de Gobernanza del Agua (zona alta)

El resultado del índice es MALO.

Acciones recomendadas:

Corto Plazo (< 2 años):

1. Definir e implementar estrategias para el manejo de conflictos por el uso del agua y el suelo por los diversos actores de la zona.
2. Promover la participación comunitaria para la GIRH y la Gestión del territorio de la zona.
3. Promover la presencia de instituciones, gremios y organizaciones para la GIRH y la Gestión del territorio de la zona.

Mediano Plazo (2 y 5 años):

1. Evaluar el nivel de conflictos y las estrategias implementadas.
2. Definir los representantes y participar en la conformación del Comité de la Microcuenca de la zona.
3. Definir los representantes institucionales, gremios y organizaciones para participar en el Comité de la Microcuenca.

Figura 6.8 Reporte pdf del sistema de apoyo a las decisiones *cuencandina*.

Tabla 6. 3 Intervenciones por índice ICASup para la zona alta de la microcuenca el Chocho.

Corto plazo (<2años)	Mediano plazo (2-5años)	Largo plazo (>5 años)
1. Implementar acciones para conservar y restaurar ecosistemas estratégicos: bosques y franjas protectoras de las fuentes superficiales. 2. Implementar acciones para prevenir y controlar la erosión y la sedimentación: revegetación y reforestación. 3. Abandono de cultivos y actividad ganadera. Construir cortafuegos y drenajes fluviales. 4. Si hay minería, debe erradicarse en su totalidad. Definir estrategias para no dejar implementar minería en la zona. 5. Identificar los bienes y servicios ecosistémicos.	1. Evaluar las acciones implementadas para conservar y restaurar ecosistemas estratégicos: bosques y franjas protectoras de las fuentes superficiales. 2. Evaluar las acciones implementadas para prevenir y controlar la erosión y la sedimentación. 3. Continuar con las políticas de no a los cultivos y actividad ganadera. 4. Implementar estrategias de cerrado de minería. Evaluar e implementar estrategias para no dejar implementar minería en la zona alta. 5. Implementar un esquema de compensación y pago de bienes y servicios ecosistémicos por parte de la comunidad de la cuenca media y baja.	1. Generar estrategias para la sostenibilidad de las acciones implementadas para conservar y restaurar ecosistemas estratégicos. 2. Generar estrategias para la sostenibilidad de las acciones implementadas para prevenir y controlar la erosión. 3. Continuar con las políticas de no a los cultivos y actividad ganadera. 4. Evaluar los impactos negativos y positivos del proceso de minería en la zona alta. 5. Evaluar sostenibilidad del esquema de compensación de bienes y servicios ecosistémicos.

Tabla 6. 4 Intervenciones por índice ICC para la zona alta de la microcuenca andina el Chocho

Corto plazo (<2años)	Mediano plazo (2-5años)	Largo plazo (>5 años)
1. La comunidad debe participar e integrarse a programas de adaptación al cambio climático. 2. Definición de línea base relacionada con desastres naturales, las amenazas y vulnerabilidades locales. 3. Instalación de tecnologías de bajo costo para el monitoreo del clima y la precipitación.	1. Sistematizar y ampliar el conocimiento sobre patrones de riesgos de desastres naturales. 2. Propuestas de políticas y medidas de adaptación en temas de agua, suelo, actividad forestal, agrícola, pecuaria, pesca, salud y hábitat. 3. Capacitación a escuelas y colegios de la zona en la recolección de datos climatológicos.	1. Generar mapas sobre amenazas climáticas y condiciones de vulnerabilidad en la zona. 2. Evaluación de implementación de políticas y medidas de adaptación al cambio climático. 3. Compartir datos, información y conocimiento con los actores de la zona, otras microcuencas e instituciones a nivel regional y nacional.

6.3 DISCUSIÓN

Se realizó la caracterización de los principales problemas de la microcuenca andina el Chocho, ubicada en la zona rural del municipio de Cali, Departamento del Valle del Cauca. La tipificación de los principales problemas se realizó siguiendo los subsistemas utilizados para generar el modelo conceptual basado en conocimiento desarrollado en el capítulo 4. Esta caracterización se pudo realizar a través de información secundaria de otros estudios realizados en esta microcuenca, fue complementada con visitas y entrevistas con actores claves de la misma. A partir de lo cual, se diligenció el formato con cada uno de los indicadores PER requeridos por el prototipo y no se encontró mayor dificultad en encontrar los datos, información y conocimiento requeridos. Tanto a nivel secundario como a nivel primario.

El prototipo SSD-BC-Web *cuencandina*, se aplicó considerando el conjunto de datos, información y conocimiento, obtenidos de la microcuenca andina el Chocho. A nivel operativo el prototipo demostró ser flexible, amigable, fácil de operar y genera información rápida y oportuna para apoyar la toma de decisiones en la planeación de la microcuenca. Sin embargo, es necesario trabajar en algunos aspectos de amigabilidad, como por ejemplo, que los datos digitados inicialmente se puedan recuperar, pues en la actualidad, hay que digitarlos cada que se requieren usarlos, sin embargo, los valores de los índices y los informes con las recomendaciones son fácilmente recuperables y se guarda una versión por cada una de las corridas del SSD.

A través de los resultados de la aplicación del prototipo SSD-BC-Web *cuencandina*, se evidenció la grave situación socio-ambiental de la microcuenca de la quebrada el Chocho, en cada una de las zonas evaluadas: cuenca alta, media y baja, considerando que el valor de los índices evaluados presentan en general un valor de MALO, coincidiendo con el estudio de Marín (2004) y Domínguez y Corrales (2006) donde concluyen que la situación socio-ambiental en la microcuenca el Chocho se mueven en el rango de crítico y muy crítico.

En este sentido el prototipo genera una coincidencia con otros estudios y con la realidad de la microcuenca, pero que ahora con el valor de los índices estas afirmaciones pueden considerarse más objetivas que subjetivas y generan una calificación que puede ser más representativo de la situación de una microcuenca. Sin embargo, es necesario profundizar en el proceso de evaluación, validación y mantenimiento del prototipo SSD-BC-Web *cuencandina*, realizando una aplicación a otras microcuencas con una gama más amplia del estado socio-ambiental de ellas, bueno, regular y malo, que permitan evidenciar el desempeño del sistema.

A diferencia de las intervenciones recomendadas por Marín (2004) y Domínguez y Corrales (2006), el prototipo SSD-BC-Web *cuencandina*, genera intervenciones para alcanzar la sostenibilidad en la microcuenca andina considerando las diversas zonas de la cuenca: alta, media y baja e intervenciones a corto, mediano y largo plazo. Generalmente, los planes de ordenación de cuencas hidrográficas en el país, no hacen diferencias entre las diversas zonas de la cuenca ni entre la variación temporal de las intervenciones.

Los estudios de Marín (2004) y Domínguez y Corrales (2006), recomiendan las siguientes intervenciones para la microcuenca el Chocho: recuperación de terrenos en la parte alta de la cuenca, monitoreo de calidad de agua y vertimientos, implantación del plan de manejo ambiental de la minería del carbón, sensibilización y capacitación a los usuarios de la parte alta en prácticas de saneamiento adecuadas, fortalecimiento operativo de la autoridad ambiental, fortalecimiento de las políticas de control demográfico, fortalecimiento de las juntas de agua y articulación del trabajo entre actores internos y externos. Mientras el prototipo *cuencandina* enfatiza en implementar intervenciones de acuerdo al valor producido por los 6 índices definidos en el modelo: índice de calidad de agua superficial, ICAsup; índice de degradación del

suelo, IDS; índice de cambio climático, ICC; índice de gobernanza del agua, IGBA; índice de educación y cultura del agua, IEDCA; índice de datos, información y conocimiento, IDIC.

Entre las intervenciones propuestas por el prototipo *cuencandina* de acuerdo al valor los índices se encuentran: producción y consumo sostenible, evaluación e implementación de prácticas agrícolas sostenibles, participación comunitaria, sistematización de conocimiento, implementación de políticas de adaptación y mitigación al cambio climático, construcción y evaluación de sistema de tratamiento de aguas residuales, desarrollar estrategias de educación ambiental, generar procesos de ecomonitoreo, trabajo institucional y conformar y consolidar el comité de la microcuenca, entre otros.

Como se puede observar, las intervenciones recomendadas por el modelo *cuencandina*, son más integrales pues consideran la microcuenca como un sistema complejo, considerando varios subsistemas para la toma de decisiones en el proceso de planeación. Estos resultados constituyen una base fundamental de información y conocimiento para el apoyo de la toma de decisiones por los diversos actores en la microcuenca.

La problemática encontrada en la microcuenca el Chocho, es similar a los problemas reflejados en la mayoría de microcuencas, subcuencas y cuencas hidrográficas del país. Y muy probablemente de algunos países de la región tropical andina. En esta medida se podría utilizar el prototipo SSD-BC-Web *cuencandina* en cada uno de ellas para realizar el proceso de planeación de las mismas.

6.4 CONCLUSIONES

Se aplicó el prototipo denominado SSD-BC-Web *cuencandina* a la microcuenca andina el Chocho, ubicada en la zona rural del municipio de Cali, Departamento del Valle del Cauca. El prototipo SSD-BC-Web *cuencandina*, se diseñó y codificó utilizando una combinación de lenguajes de programación de código abierto. El prototipo *cuencandina* puede ser una herramienta de gestión, diseño, implementación, evaluación de política y apoyo a la toma de decisiones en la planeación de microcuencas andinas para los diversos actores de la microcuenca y para autoridades e instituciones relacionadas con la gestión integral de los recursos hídricos. El prototipo fue desarrollado para usar sin licencia, en Web, es flexible, amigable, fácil de operar y genera información rápida, oportuna y fácil de analizar e interpretar por diversos actores de una cuenca hidrográfica.

Entre las intervenciones propuestas por el prototipo *cuencandina* para la microcuenca el Chocho que no fueron consideradas en otros estudios se encuentran: producción y consumo sostenible, evaluación e implementación de prácticas agrícolas sostenibles, participación comunitaria, sistematización de conocimiento, implementación de políticas de adaptación y mitigación al cambio climático, construcción y evaluación de sistema de tratamiento de aguas residuales, desarrollar estrategias de educación ambiental, generar procesos de ecomonitoreo, trabajo institucional y conformar y consolidar el comité de la microcuenca, entre otros.

El prototipo SSD-BC-Web *cuencandina* permitió evaluar los resultados de la aplicación en un escenario de condiciones socio-ambientales críticas, evidenciando en este caso específico, los resultados coherentes de la aplicación en estas condiciones. Sin embargo, es necesario realizar evaluaciones con otros escenarios de situaciones socio-ambientales de microcuencas andinas.

El prototipo apoya la toma de decisiones a través de la estimación del valor de seis índices que evalúan la sostenibilidad de una microcuenca andina. Los índices se basan en indicadores PER, lógica difusa y gestión de conocimiento. La aplicación del sistema *cuencandina* en la microcuenca el Chocho demostró su utilidad en la evaluación de la realidad socio-ambiental de esta microcuenca y la coherencia con las intervenciones recomendadas en otros estudios desarrollados. Además, generó intervenciones para la zona alta, media y baja de la microcuenca considerando la variación temporal de las intervenciones en el corto, mediano y largo plazo.

7. CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES

La principal contribución de esta investigación es el desarrollo de un modelo conceptual y operativo basado en la gestión de conocimiento para el apoyo a la toma de decisiones de diversos actores en la planeación de cuencas hidrográficas. Estos modelos potencian la búsqueda y selección de intervenciones en el marco de una cuenca hidrográfica sostenible. El modelo conceptual definido puede utilizarse en diversos procesos de planeación, tanto a nivel mundial como a nivel nacional, pues concentra los tópicos actuales y fundamentales para la planeación de una cuenca hidrográfica.

Tal aporte se materializó considerando una combinación estratégica de diversos conceptos y herramientas metodológicas. A nivel de modelos conceptuales se utilizaron de forma integrada los siguientes: Teoría General de Sistemas (TGS), Desarrollo Sustentable (DS), Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH), Modelos de Planeación (MP), Modelos Basados en Conocimiento (MBC), Sistemas Soporte a la Decisión (SSD) e Inteligencia Artificial (IA). Las herramientas metodológicas utilizadas fueron: modelos estadísticos, modelos basados en conocimiento, indicadores e índices de presión, estado, respuesta y lógica difusa, desarrollo de software.

Se han obtenido conclusiones más específicas relacionadas con cada uno de los objetivos de esta investigación, las cuales se presentan a continuación. En el desarrollo del objetivo 1: caracterizar los principales problemas de las cuencas hidrográficas en Colombia a través del proceso de gestión de conocimiento, se obtuvieron las siguientes conclusiones principales:

- A través de la gestión de conocimiento, se presenta por primera en el país, una tipificación y jerarquización de los principales problemas de una cuenca hidrográfica, conceptualizando la cuenca como un sistema complejo compuesto por 13 subsistemas: biodiversidad y ecosistemas, bio-físico agua, bio-físico suelo, bio-físico aire, productivo, tecnológico, legal, político, institucional, cultural, social, económico y conocimiento e información.
- Esta definición evidencia la importancia de incorporar algunos componentes fundamentales en el proceso de análisis del sistema CH, que no han sido considerados en otros estudios, como son el subsistema conocimiento e información, subdividir el subsistema biofísico en los componentes agua, suelo, aire, biodiversidad y ecosistemas. De igual forma, diferenciar el subsistema económico del subsistema productivo e incluir el subsistema legal y el subsistema tecnológico. Los subsistemas definidos permitieron caracterizar específicamente los problemas y procesos de una cuenca hidrográfica, de tal forma que se puedan identificar intervenciones a realizarse en el corto, mediano y largo plazo, diferenciando entre la cuenca alta, media y baja.

- En Colombia, el principal problema definido en cada uno de los trece subsistema evaluados para una cuenca hidrográfica fueron: contaminación atmosférica, erosión, contaminación del agua, pérdida de biodiversidad, conflictos por uso del suelo y el agua, corrupción, escasos recursos para los procesos de planeación y ordenación de cuencas, falta de educación y cultura del agua, incumplimiento de leyes y normas, baja transferencia de tecnología, descoordinación institucional, inadecuadas prácticas agrícolas y falta de información ambiental. De estos, los más representados en los POMCAs en el país, son los bio-físicos como erosión, contaminación del agua, pérdida de biodiversidad y conflictos por el uso del agua, sin embargo, otros problemas identificados en este estudio, no forman parte de estos POMCAs, como: conflictos por el uso del suelo, contaminación atmosférica, corrupción, escasos recursos para PCH, incumplimiento de leyes y normas, baja transferencia de tecnología, descoordinación institucional, inadecuadas prácticas agrícolas y falta de información ambiental.
- Se evidenció la importancia del uso del enfoque de sistemas y la aplicación de los diversos procesos de la gestión del conocimiento para la generación de una base de conocimiento sobre los principales problemas de las cuencas hidrográficas del país. Esta base de conocimiento podría considerarse como herramienta fundamental en las primeras etapa de realización de los planes de ordenamiento de cuencas hidrográficas en el país y generar intervenciones que permitan remediar o erradicar, tanto los problemas principales como sus causas, en la búsqueda de una cuenca hidrográfica sostenible.

En el desarrollo del objetivo 2: definir un modelo conceptual para el apoyo a la toma de decisiones en la planeación de cuencas hidrográficas, se obtuvieron las siguientes conclusiones principales:

- Se definió un nuevo modelo conceptual de planeación (MCP) que complementa y actualiza diversos modelos tanto a nivel nacional como mundial en la PCH. El nuevo modelo contribuye al entendimiento del sistema cuenca e identifica los ejes fundamentales para la toma de decisiones en el proceso de PCH sostenible. Este modelo facilita la selección de intervenciones en la búsqueda de la sostenibilidad de una CH, provee una visión holística y define las etapas del proceso de planeación como un sistema, donde la gestión de conocimiento es fundamental para la toma de decisiones.
- El MCP incluye 16 ejes fundamentales que deben ser considerados en el proceso de planeación de una CH, los cuales son: desarrollo sustentable para la gestión del agua, producción limpia y consumo sostenible, educación ambiental, cultura del agua, gestión del conocimiento, servicios ecosistémicos, cambio climático, monitoreo ecoambiental, ordenamiento ecológico territorial, gestión del riesgo ambiental, gobernanza del agua, institucionalidad, participación comunitaria, uso eficiente del agua,

herramientas metodológicas y herramientas económicas. Los ejes que no han sido considerados en otros modelos son: gestión del conocimiento, monitoreo ecoambiental, cambio climático, ordenamiento ecológico territorial, así mismo, en cada uno de estos ejes se definen las principales intervenciones a implementar para alcanzar una cuenca hidrográfica sostenible, lo que no está presente en ninguno de los diversos modelos revisados.

- Las etapas del proceso de la PCH fue redefinido como un sistema integrado por tres subsistemas: organizativo, conocimiento, y monitoreo y evaluación, contrario al esquema desarrollado en el país donde el proceso de planeación tiene diferentes etapas planteadas de forma lineal y donde la gestión de conocimiento no forma parte integral del proceso, estas etapas son: aprestamiento, diagnóstico, prospectiva, formulación, ejecución, seguimiento y evaluación.
- El nuevo modelo conceptual evidencia la importancia de evaluar la variación espacial y temporal en la PCH, a través de considerar la cuenca alta, media y baja y tener una escala de intervenciones en el corto, mediano y largo plazo. De igual forma, enfatiza en iniciar el proceso de planeación por microcuencas hasta llegar a la gran cuenca. El modelo conceptual definido puede actualizarse permanentemente, tanto en sus ejes como en las intervenciones definidas. Esta puede ser utilizado tanto a nivel mundial como a nivel nacional, pues concentra los tópicos actuales y fundamentales para la planeación de una cuenca hidrográfica.

En el desarrollo del objetivo 3: construir un modelo operativo basado en conocimiento para la planeación de microcuencas andinas, usando tecnología de la inteligencia artificial, se obtuvieron las siguientes conclusiones principales:

- A partir del modelo conceptual y la tipificación de problemas, se construyó un nuevo modelo basado en conocimiento (MBC) denominado *cuencandina*, que integra cuatro subsistemas: bio-físico, socio-económico, político-institucional y conocimiento e información. El MBC se conceptualiza a través de la definición de 18 índices cualitativos y 6 índices para cada zona de la cuenca, integrados por indicadores de carácter cualitativo y cuantitativo. En el subsistema bio-físico se definieron 3 temas estratégicos y 3 índices asociados: tema 1: calidad de agua; índice 1: índice de calidad de agua superficial (**ICASup**), tema 2: degradación del suelo; índice 2: índice de degradación del suelo (**IDS**) y tema 3: cambio climático; índice 3: índice de cambio climático (**ICC**). En el subsistema socio-económico se definió un tema y un índice asociado: tema: educación y cultural del agua, índice: índice de educación y cultural del agua (**IEDCA**).

- El sistema de índices e indicadores definidos son operados a través de la integración de tres técnicas analíticas: presión-estado-respuesta (PER), lógica difusa y gestión de conocimiento, estos dos últimos definidos dentro de las técnicas de la inteligencia artificial. Cada índice genera un número de reglas para el proceso de toma de decisiones para la planeación de una microcuenca andina. El índice **ICASup** generó 207 reglas de decisión, el índice **IDS** generó 198 reglas de decisión, el índice **ICC** generó 183 reglas de decisión, el índice **IGBA** generó 207 reglas de decisión, el índice **IEDCA** generó 153 reglas y el índice **IDIC** generó 153 reglas de decisión. En total el modelo MBC *cuencandina* definió 1.101 reglas para la toma de decisiones en la planeación de una microcuenca andina.
- El MBC *cuencandina* aborda la complejidad y los principales problemas de una cuenca hidrográfica y esta conceptualizado para aplicarse como un apoyo a la toma de decisiones en la planeación de microcuencas andinas en Colombia. El MBC es un avance en los procesos de modelación de conocimiento para la toma de decisiones en la gestión integrada de los recursos hídricos. Así mismo, genera intervenciones considerando el valor de cada índice, a través de la variación espacial en la microcuenca: cuenca alta, media y baja y la variación temporal de las intervenciones en corto, mediano y largo plazo.
- El MBC *cuencandina* es una herramienta para el apoyo en la toma de decisiones informada, objetiva y metódica, para la planeación de microcuencas andinas, a través de un sistema de índices cualitativos, que operan con indicadores tanto de carácter cualitativo como cuantitativo. La aplicación del sistema de índices, permitirá una evaluación sencilla, ágil y oportuna del estado socio-ambiental de una microcuenca andina. El sistema de índices e indicadores, es versátil y de carácter medible, para reflejar el estado socio-ambiental de una microcuenca para diferentes actores.

En el desarrollo del objetivo 4: construir un prototipo computacional operando en Web con software de dominio público para operar el modelo operativo basado en conocimiento, se obtuvieron las siguientes conclusiones principales:

- Un nuevo prototipo de un sistema de apoyo a las decisiones basado en conocimiento se desarrolló para el apoyo a la planeación de microcuencas andinas. El prototipo denominado SSD-BC-Web *cuencandina* es un sistema diseñado para ser una herramienta de gestión, diseño, implementación, evaluación de política y apoyo a la toma de decisiones en la planeación de microcuencas andinas. El prototipo ha sido desarrollado para usar sin licencia, en Web, con el objetivo de ser flexible, amigable, fácil de operar y

generar información rápida y oportuna, para diversos actores de una cuenca hidrográfica. Al prototipo se puede acceder a través de la siguiente dirección electrónica: <http://cuencandina.univalle.edu.co>.

- El prototipo SSD-BC-Web *cuencandina* sistematizó los 18 índices definidos en el MBC *cuencandina*, y las 1.101 reglas para la toma de decisiones en la planeación de una microcuenca andina. El prototipo es una herramienta diseñada para contribuir a la toma de decisiones, a la organización, sistematización y transferencia de conocimiento para la planeación de los recursos hídricos en microcuencas andinas, el cual se podrá utilizar en línea por cualquier institución o diversos profesionales, técnicos, científicos, estudiantes y actores de una cuenca hidrográfica.
- El prototipo SSD-BC-Web *cuencandina* puede considerarse una herramienta potencialmente útil, pues permitiría agilizar el proceso de planeación de microcuencas andinas en el país. Así mismo, reducir el tiempo para la evaluación integral de una microcuenca y la definición de intervenciones, generando una mayor eficacia global y disminuyendo los costos de elaboración de los planes de ordenamiento en microcuencas. Adicionalmente, apoya el proceso de formación y aprendizaje entre los diversos actores y promueve una cultura de la gestión de conocimiento como pilar fundamental de la planeación de los recursos hídricos.
- Las tecnologías de la información y la comunicación (TIC's) proveen un buen soporte tecnológico para la implementación de sistemas de la inteligencia artificial, en sistemas donde la toma de decisiones es compleja, como el caso de los sistemas ambientales y de los recursos hídricos.

En el desarrollo del objetivo 5: aplicar el prototipo computacional en una microcuenca andina de la cuenca alta del río Cauca en el Departamento del Valle del Cauca en Colombia, se obtuvieron las siguientes conclusiones principales:

- Se aplicó el prototipo SSD-BC-Web *cuencandina* a la microcuenca andina el Chocho, ubicada en la zona rural del municipio de Cali, Departamento del Valle del Cauca. Esta aplicación demostró su utilidad en la evaluación de la realidad socio-ambiental de esta microcuenca y la coherencia con la definida en otros estudios. Todos los índices evaluados generaron una calificación de *malo*, excepto para el índice ICC de la parte media de la microcuenca con valor de *regular*.
- El prototipo SSD-BC-Web *cuencandina*, generó intervenciones para la zona alta, media y baja de la microcuenca considerando la variación temporal de las intervenciones en el corto, mediano y largo

plazo, lo cual no ha sucedido con estudios en la microcuenca evaluada, otras microcuencas u otras cuencas hidrográficas.

- Entre las intervenciones propuestas por el prototipo *cuencandina* para la microcuenca el Chocho que no fueron consideradas en otros estudios se encuentran: producción y consumo sostenible, evaluación e implementación de prácticas agrícolas sostenibles, participación comunitaria, sistematización de conocimiento, implementación de políticas de adaptación y mitigación al cambio climático, construcción y evaluación de sistema de tratamiento de aguas residuales, desarrollar estrategias de educación ambiental, generar procesos de ecomonitoreo, trabajo institucional y conformar y consolidar el comité de la microcuenca, entre otros.
- El prototipo SSD-BC-Web *cuencandina* permitió evaluar los resultados de la aplicación en un escenario de condiciones socio-ambientales críticas, evidenciando en este caso específico, los resultados coherentes de la aplicación en estas condiciones. Sin embargo, es necesario realizar evaluaciones con otros escenarios de situaciones socio-ambientales de microcuencas andinas.

7.2 ESTUDIOS FUTUROS

Los elementos conceptuales y operativos propuestos en esta investigación permiten definir posibles desarrollos futuros, ya que el modelo conceptual y el prototipo SSD-BC-Web *cuencandina*, permite explorar y desarrollar futuros áreas de desarrollo tales como:

- Consolidar el proceso de construcción de índices desarrollado en esta investigación como un esquema metodológico genérico en estudios complejos de toma de decisiones ambientales.
- Generar un índice general sobre el estado de sostenibilidad de una microcuenca andina, a través de la agregación y asignación de pesos a los índices definidos en esta investigación y complementados con otros como: índice de aguas subterráneas, índices de riesgo ante sequía e índice de desastres naturales, entre otros.
- Considerando que el conocimiento no es estático, sino dinámico y con componentes de incertidumbre es necesario periódicamente evaluar, organizar, integrar y ajustar al modelo conceptual y el sistema de soporte a las decisiones: *cuencandina*.
- Es necesario realizar un proceso de evaluación amplio, tanto del modelo de conocimiento como del sistema de apoyo a las decisiones, *cuencandina*, considerando diversas microcuencas con diferentes

niveles socio-ambientales. Así mismo, es necesario realizar los ajustes para su aplicación a otras regiones de la región andina y a otras regiones del territorio nacional e internacional.

- Generar un proceso de evaluación, análisis de sensibilidad, desempeño y ajuste ante diferentes valores de los indicadores e índices propuestos en el modelo basado en conocimiento y el prototipo SSD-BC-Web *cuencandina*.
- Generar estrategias para la cooperación e integración del conocimiento científico, técnico, local, ancestral e indígena, con el fin de generar un proceso continuo de revisión y actualización de las acciones recomendadas en el corto, mediano y largo plazo, para las zonas altas, medias y bajas en una microcuenca.
- Deben en el futuro integrarse sistemas de información geográfica SIG al prototipo computacional SSD-BC-Web *cuencandina* y completarse los indicadores Presión-Estado-Respuesta (PER) en el modelo más general de Fuerza motriz-Presión-Estado-Respuesta-Impacto (FPERI). Así mismo, se podría generar un estudio de sensibilidad al cambio de las funciones de pertenencia con otras funciones.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ABDUL, G. P. H., KAMIL, Y. M., ABD., M., LAFIFAH y BIN, D. M. (2009). Knowledge-Based System for River Water Quality Management. *European Journal of Scientific Research*, 33, 153-162.
- ADINARAYANA, J., GOLPA, R. K., KRISHNA, R. N., VENKATACHALAM, P. y SURI, J. K. (1999). A rule-based soil erosion model for a hilly catchment. *Catena*, 37, 309-318.
- ADRIAENSSENS, V., GOETHALS, P. L. M. y DE PAUW, N. (2006). Fuzzy knowledge-based models for prediction of *Asellus* and *Gammarus* in watercourses in Flanders (Belgium). *Ecological Modelling*, 195, 3-10.
- AL-JAYYOUSI, O. (2004). Greywater reuse: knowledge management for sustainability. *Desalination*, 167, 27-37.
- ALBRECHT, J. (2013). The Europeanization of water law by the Water Framework Directive: A second chance for water planning in Germany. *Land Use Policy*, 30, 381-391.
- ALLAN, R. (2012). Water sustainability and the implementation of the Water Framework Directive- a European perspective. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 12, 171-178.
- ANDERSON, I., PETERSSON, M. y JARSJÖ, J. (2012). Impact of the European Water Framework Directive on local-level water management: Case study Oxunda Catchment, Sweden. *Land Use Policy*, 29, 73-82.
- ANDERSSON, A., GRÖNLUND, A. y ASTRÖM, J. (2012). "You can't make this a science!" - Analyzing decision support systems in political contexts. *Government Information Quarterly*, 29, 543-552.
- ANDRADE, Á. (2007). Aplicación del Enfoque Ecosistémico en Latinoamérica, Bogotá, Colombia, CEM-UICN, 89.
- ARANDA, C. J. D. J. (2007). Uso eficiente del agua. *Aquaforum*, 34, 32-34.
- ARANGO, C. A., GUZMÁN, E. y CORREA, M. E. (2000). Conceptos sobre motivaciones y obstáculos para su implementación en Colombia, Colombia, Centro Nacional de Producción Más Limpia (CNPMLTA), 12.
- ARAÚJO, J. C., DE ABREU, C. B. R., DOELL, P., HAUSCHILD, M. y BARBOSA, C. P. (2000). Basis for a Decision Support System(DSS) for Water Resources Management in Brazilian Semi-Arid. *German-Brazilian Workshop on Neotropical Ecosystems*, 7.
- ARREGUÍN, C. F. I. (1991). Uso eficiente del agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, CNA. México, 23.
- ARROJO, A. P., AUZA, B. G., BARLOW, M., BEAUFORT, E. y BELL, L. C. (2007). Colombia: ¿Un futuro sin agua?. Bogotá. Colombia, Ecofondo. Foro Nacional Ambiental y Ediciones desde abajo, 334.
- ASSAF, H. y SAADEH, M. (2008). Assessing water quality management options in the Upper Litani Basin, Lebanon, using an integrated GIS-based decision support system. *Environmental Modelling & Software*, 23, 11.
- AULINAS, M., NIEVES, J. C., CORTÉS, U. y POCH, M. (2011). Supporting decision making in urban wastewater systems using a knowledge-based approach. *Environmental Modelling & Software*, 26, 562-572.
- BEAUFORT, E. 2007. La gestión pública del agua en Colombia. . *En Colombia: ¿Un futuro sin agua?* Bogotá D.C. Colombia: Ecofondo, Foro Nacional Ambiental y Ediciones desde bajo.
- BECERRA, F. I. (2000). The role of artificial intelligence technologies in the implementation of People-Finder knowledge management systems. *Knowledge-Based System*, 13, 315-320.
- BECU, N., NEEF, A., SCHREINEMACHERS, P. y SANGKAPITUX, C. (2008). Participatory computer simulation to support collective decision-making: Potencial and limits of stakeholder involvement. *Land Use Policy*, 25, 11.
- BHARGAVA, H. K., POWER, D. J. y SUN, D. (2007). Progress in Web-based decision support technologies. *Decision Support Systems*, 43, 12.
- BHAVE, A. G., MISHRA, A. y RAGHUWANSHI, N. S. (2013). A combined bottom-up and top-down approach for assessment of climate change adaptation options. *Journal of Hydrology*, Article in press.

- BJORNSON, F. O. y DINGSOYR, T. (2008). Knowledge management in software engineering: A systematic review of studied concepts, findings and research methods used. *Information and Software Technology*, 50, 1055-1068.
- BREZONIK, PATRICK L, EASTER, K. W., HATCH, L., MULLA, D. y PERRY, J. (1999). Management of diffuse pollution in agricultural watersheds: lessons from the minnesota river basin. *Water Technology*, 39, 323-330.
- BUCCHERI, M. J. y COMELLAS, E. A. (2011). Indicadores para el monitoreo y evaluación hacia la GIRH, Argentina, Instituto Nacional del Agua - Centro de Economía, Legislación y Administración del Agua (INA-CELA) y Universidad Nacional de Cuyo - Instituto de Ciencias Ambientales (ICA-UNCUYO), 25.
- BUSTAMANTE, ROCIO y PALACIOS, PAULINA (2005). Gobernanza, Gobernabilidad y Agua en los Andes. Un análisis conceptual y contextual. www.negowat.org.
- CAICEDO, D. (2012). Objetivos con criterio ecológico, Diario El Tiempo. Bogotá. Colombia. 22 de Abril, 20.
- CAM (2003). Agua y educación ambiental: nuevas propuestas para la acción. Memorias de congreso, Alicante, España, Caja de ahorros del Mediterraneo, 287.
- CAMACHO-SANDOVAL, J. y DUQUE, H. (2001). Indicators for biodiversity assessment in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 87, 141-150.
- CAR (2006a). Diagnóstico prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica de los ríos Ubaté y Suárez, Bogotá D.C., Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR, 308.
- CAR (2006b). Estudio de diagnóstico, prospectiva y formulación para la cuenca hidrográfica del río Minero. Resumen ejecutivo, Bogotá D.C., Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR, 46.
- CAR (2006c). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá, Bogotá, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR, 104.
- CAR (2008). Formulación del plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Salitre en el perímetro urbano del distrito capital, Bogotá D.C., Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca -CAR, 204.
- CARDER (2005). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Otún, Pereira, Risaralda, Corporación Autónoma Regional de Risaralda - CARDER; Parques Nacionales Naturales de Colombia -PNN, 15.
- CARDER (2008). Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Campoalegre, Pereira, Risaralda, CORPOCALDAS- CARDER - UAESPNN - Corporación ALDEA GLOBAL, 119.
- CARVALHO, P. G. y FAVILLA, E. N. F. (2009a). Knowledge discovering for coastal waters classification. *Expert Systems with Applications*, 36, 8604-8609.
- CARVALHO, P. G. y FAVILLA, E. N. F. (2009b). Knowledge discovering for coastal waters classification. *Expert Systems with Applications*, 36, 6.
- CEPAL (2006). Estrategia nacional de gestión integrada de cuencas hidrográficas, Santiago de Chile, Comisión Nacional del Medio Ambiente, 24.
- CERDÁN, C. R., REBOLLEDO, M. C., SOTO, G., RAPIDEL, B. y SINCLAIR, F. L. (2012). Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agricultural Systems*, 110, 119-130.
- CGR (2008). Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente. 2007-2008. *Contraloría General de la República. Bogotá. Colombia*.
- CGR (2011). Estado de los recursos naturales y del ambiente. 2009-2010, Bogotá, Colombia, Contraloría General de la República, 332.
- CGR (2012). Informe del estado de los recursos naturales y del ambiente. 2012-2013., Bogotá, Colombia, Contraloría General de la República, 424.
- CIAT (2003). Marco conceptual para el manejo integrado de cuencas. Proyecto comunidades y cuencas, Managua, Nicaragua, II Foro nacional de cuencas hidrográficas, 14.
- CINARA (2000). Normas Públicas en Colombia a Principios del Siglo XIX. *Rumor de Agua. No. 73*, Santiago de Cali. Colombia.

- CINARA (2011). Guía metodológica para aplicar el modelo para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico en cuencas hidrográficas. *Universidad del Valle. Cali, Colombia y Universidad Tecnológica de Pereira (UTP)*.
- CIP (2007). Gestión integral de cuencas. La experiencia del Proyecto Regional Cuencas Andinas, Lima, Perú, Centro Internacional de la Papa -CIP, 236.
- COLMENARES, F., RAFAEL. (ed.) 2007. Colombia: ¿Un futuro sin agua?. Bogotá. Colombia.
- COMAS, J., RODRÍGUEZ-RODA, I., SÀNCHEZ-MARRÈ, M., CORTÉS, U. y FREIXÓ, A. (2003). A knowledge-based approach to the deflocculation problem: integrating on-line, off-line, and heuristic information. *Water Research*, 37, 2377-2387.
- CONANP (2006). Estrategia nacional para un desarrollo sustentable del turismo y la recreación en las áreas protegidas de México, México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 81.
- CONDESAN-INFOANDINA (2003). Gestión integral de microcuencas andinas, Lima, Perú, Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecoregión Andina-CONDESAN.
- CONTRALORÍA (2007). Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente. 2007-2008. *Contraloría General de la República. Bogotá. Colombia*.
- CORPOAMAZONIA (2009a). Plan de ordenación y manejo de la cuenca de la Quebrada El Doncello, Departamento del Caquetá, Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia Corpoamazonia- CORPOAMAZONIA ; Servicios Ambientales, Consultoría, Salud y Desarrollo Regional - ECOINTEGRAL LTDA, 166.
- CORPOAMAZONIA (2009b). Plan de ordenación y manejo de la cuenca de la Quebrada La Borugo (El Paujil), Departamento del Caquetá, Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia - CORPOAMAZONIA; Servicios Ambientales, Consultoría, Salud y Desarrollo Regional - ECOINTEGRAL LTDA, 169.
- CORPOAMAZONIA (2009c). Resumen Plan de Ordenación y Manejo microcuenca de la Quebrada Curiyaco, Mocoa, Putumayo, Corporación para el Desarrollo Sostenible del Sur de la Amazonia - CORPOAMAZONIA; Servicios Ambientales, Consultoría, Salud y Desarrollo Regional - ECOINTEGRAL LTDA.
- CORZO, G. y SOLOMATINE, D. (2007a). Knowledge-based modularization and global optimization of artificial neural network models in hydrological forecasting. *Neural Networks*, 20, 9.
- CORZO, G. y SOLOMATINE, D. (2007b). Knowledge-based modularization and global optimization of artificial neural network models in hydrological forecasting. *Neural Networks*, 20, 528-536.
- CPN (1991). Constitución Política de Colombia, Bogotá, Colombia, Congreso de la República de Colombia, 108.
- CRC (2010a). Plan de ordenación y manejo de la parte alta de la subcuenca hidrográfica del río Palacé, Popayán, Cauca Corporación Autónoma Regional del Cauca - CRC y Asociación Corregimental de Usuarios Campesinos de Gabriel López Cauca - ACUC-GL.
- CRC (2010b). Plan de ordenación y manejo de la subcuenca hidrográfica río Quinamayo Cauca, Santander de Quilichao, Cauca, Corporación Autónoma Regional del Cauca-CRC; Alcaldía Municipal de Santander de Quilichao, Fundación Pro Cuenca Río Quilichao, 259.
- CRC (2010c). Plan de ordenación y manejo parte baja de la subcuenca hidrográfica del río San Jorge, Popayán, Cauca, Corporación Autónoma Regional del Cauca - CRC ; Fundación Raíces por un Desarrollo Sostenible - FUNRAICES, 267.
- CRQ (2008). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río La Vieja, Armenia, Quindío, Corporación Autónoma Regional del Quindío - CRQ, 358.
- CRQ (2011a). Plan de manejo subcuenca río Quindío, Armenia, Quindío, Corporación Autónoma Regional del Quindío - CRQ, 240.
- CRQ (2011b). Plan de manejo subcuenca río Roble, Armenia, Quindío, Corporación Autónoma Regional del Quindío - CRQ, 228.
- CUI, J.-J. y WANG, D.-Y. (2013). Application of knowledge-based engineering in ship structural design and optimization. *Ocean Engineering*, 72, 124-139.

- CVC-UNIVALLE (2007). El Río Cauca en su valle alto, Santiago de Cali, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle, 400.
- CVC (2007). Actualización plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Riofrio Santiago de Cali, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, Unidad Central del Valle del Cauca - UCEVA, 72.
- CVC (2009a). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica de la Quebrada Obando, Santiago de Cali, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC, 132.
- CVC (2009b). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Jamundí, Santiago de Cali, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC y Fundación para la Vida en Comunidad - FUNVIVIR.
- CVC (2010). Plan de ordenamiento y manejo (POMCH) de la cuenca del río Yumbo, Santiago de Cali, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca- CVC, Fundación PROAGUA, 73.
- CVC (2011a). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Cali, Santiago de Cali, Colombia, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. CVC. - Fundación Pachamama.
- CVC (2011b). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Guadalajara, Santiago de Cali, Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca- CVC. Corporación Río Guadalajara. CRG, 235.
- CHAPPELLE, H., CAMPBELL, N., DRAGE, J., FERNANDEZ, C. V., PARKER, L. y DUMMER, T. J. B. (2014). Understanding the translation of scientific knowledge about arsenic risk exposure among private well water users in Nova Scotia. *Science of the Total Environment*, Article in press.
- CHAU, K.-W. (2006). A review on integration of artificial intelligence into water quality modelling. *Marine Pollution Bulletin*, 52, 8.
- CHAU, K. W. (2007). An Ontology-Based Knowledge Management System for Flow and Water Quality Modeling. *Advances in Engineering Software*, 38, 172-181.
- CHAU, K. W. y CHEN, W. (2001). An example of expert system on numerical modelling system in coastal processes. *Advances in engineering software*, 32, 9.
- CHAU, K. W., CHUNTIAN, C. y LI, C. W. (2002). Knowledge management system on flow and water quality modeling. *Expert Systems with Applications*, 22, 10.
- CHAVES, H. M. L. y ALIPAZ, S. (2007). An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: The watershed sustainability index. *Water Resource Management*, 21, 883-895.
- CHEE, T. A. y BAÑARES-ALCÁNTARA, R. (2012). A knowledge representation model for the optimisation of electricity generation mixes. *Applied Energy*, 97.
- CHEN, H.-W. y CHANG, N.-B. (2010). Using fuzzy operators to address the complexity in decision making of water resources redistribution in two neighboring river basins. *Advances in Water Resources*, 33, 652-666.
- CHEN, S. H., JAKEMAN, A. J. y NORTON, J. P. (2008). Artificial Intelligence techniques: An introduction to their use for modelling environmental systems. *Mathematics and computers in simulation*, 78, 379-400.
- CHEN, V. Y. C., LIEN, H.-P., LIU, C.-H., LIOU, J. J. H., TZENG, G.-H. y YANG, L.-S. (2011). Fuzzy MCDM approach for selecting the best environment-watershed plan *Applied Soft Computing*, 11, 265-275.
- DA SILVA, J. C., MATELLI, J. A. y BAZZO, E. (2014). Development of a knowledge system for cogeneration plant design: Verification, validation and lessons learned. *Knowledge-Based Systems*, 67, 230-243.
- DAGMA (2006). Agenda ambiental de Santiago de Cali. Capítulo 1: Comuna 1. Río Aguacatal, Santiago de Cali, Colombia, Alcaldía del Municipio de Santiago de Cali, Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA).
- DAI, J. J., LORENZATO, S. y ROCKE, D. M. (2004). A knowledge-based model of watershed assessment for sediment. *Environmental Modelling & Software*, 19, 11.

- DE KOK, J.-L., KOFLAK, S., BERLEKAMP, J., HAHN, B. y WIND, H. (2009). From design to application of a decision-support system for integrated river-basin management. *Water Resource Management*, 23, 1781-1811.
- DE, S. y BEZUGLOV, A. (2006). Data model for a decision support in comprehensive nutrient management in the United States. *Environmental Modelling & Software*, 21, 852-867.
- DEBELE, B., SRINIVASAM, R. y PARLANGE, J.-Y. (2006). Coupling upland watershed and downstream waterbody hydrodynamic and water quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basin. *Environmental Model Assess*, 19.
- DIMOVA, G., TZANOV, E., NINOV, P., RIBAROVA, I. y KOSSIDA, M. (2014). Complementary use of the WEAP model to underpin the development of SEEAW physical water use and supply tables. *Procedia Engineering*, 70, 563-572.
- DOKAS, I. M. (2005). Developing Web Sites For Web Based Expert Systems: A Web Engineering Approach. *Proceedings of the Information Technologies in Environmental Engineering (ITEE'2005). Otto-von-Guericke-Universitat Magdeburg, Germany*, pp. 202-217, 15.
- DOMÍNGUEZ, C. E. A. (2005). El Estudio Nacional del Agua un Compendio sobre el Recurso Hídrico en Colombia. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM*.
- DOMÍNGUEZ, C. E. A., GONZALO, R. H., VANEGAS, S., RAQUEL y MORENO, P. (2008). Relaciones Demanda-Oferta de Agua y el Índice de Escasez de Agua como Herramientas de Evaluación del Recurso Hídrico Colombiano. *Revista de la Academia Colombiana de la Ciencia.*, XXXII, 195-212.
- DOMÍNGUEZ, I. C. y CORRALES, S. M. (2006). Caso de estudio. Microcuenca de la Quebrada el Chocho, Santiago de Cali. Valle del Cauca. Colombia, IWMI; CGIAR y CINARA-Univalle.
- DOMÍNGUEZ, J. (2009). Gobernanza del agua en las Américas México, El Colegio de México. CONACYT, 19.
- DOUROJEANNI, A. (2005). Gestión de cuencas hidrográficas y aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos, Santiago de Chile, Cepal, Naciones Unidas, 75.
- DOUROJEANNI, A., JOURAULEV, A. y CHÁVEZ, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica, Santiago de Chile, Serie recursos naturales e infraestructura. Cepal, 83.
- EDELENBOS, J., VAN BUUREN, A. y VAN SCHIE, N. (2011). Co-producing knowledge: joint knowledge production between experts, bureaucrats and stakeholders in Dutch water management projects. *Environmental Science & Policy*, 14, 675-684.
- ENA (2010). Estudio Nacional del Agua. 2010, Bogotá. Colombia, MAVDT. IDEAM, 350.
- ENGEL, A. y KORF, B. (2006). Técnicas de negociación y mediación para la ordenación de los recursos naturales, Roma. Italia, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO, 249.
- ENGEL, B. A., CHOI, J.-Y., HARBOR, J. y PANDEY, S. (2003). Web-based DSS for hydrologic impact evaluation of small watershed land use changes. *Computers and electronics in agriculture*, 39, 8.
- EPA (2008). Handbook for developing watershed plans to restore and protect our waters, Washington, DC, United States Environmental Protection Agency. Office of Water, 400.
- FAO (2006). Water resource for the future. Preparing for the next generation of watershed management programmes and projects. International Conference, Italia. Roma, FAO, 220.
- FAO (2009). ¿Por qué invertir en ordenación de las cuencas hidrográficas?, Roma. Italia, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 40.
- FAUSTINO, J. y JIMÉNEZ, F. 2000. *Manejo de cuencas hidrográficas* [Online]. Turrialba. Costa Rica: www.catie.ac.cr/www.portalcuencas.net. [Accessed 12 febrero de 2012].
- FENG, S., LI, L. X., DUAN, Z. G. y ZHANG, J. L. (2007). Assessing the impacts of South-to-North Water Transfer Project with decision support systems. *Decision Support Systems*, 42, 15.
- FIRDAUS, R., NAKAGOSHI, N. y IDRIS, A. (2014). Sustainability assessment of humid tropical watershed: A case of Batang Merao watershed, Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 722-731.

- FLORES-LOPEZ, F., ESCOBAR, M. y PURKEY, D. (2012). Un marco de apoyo a la toma de decisiones para adaptación al cambio climático, USA, Stockholm Environment Institute. SEI, 40.
- FORESTIER, G., PUISSANT, A., WEMMERT, C. y GANCARSKI, P. (2012). Knowledge-based region labeling for remote sensing image interpretation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36.
- FUKUDA, S., DE BAETS, B., WAEGEMAN, W. y VERWAEREN, J. (2013). Habitat prediction and knowledge extraction for spawning European grayling (*Thymallus thymallus* L.) using a broad range of species distribution models. *Environmental Modelling & Software*, 47, 1-6.
- GAO, P., PASTERNAK, G. B., BALI, K. y WALLENDER, W. W. (2007). Suspended-sediment transport in an intensively cultivated watershed in southeastern California. *Catena*, 69, 239-252.
- GARRIDO-BASEERBA, M., REIF, R., HERNÁNDEZ, F. y POCH, M. (2012). Implementation of a knowledge-based methodology in a decision support system for the design of suitable wastewater treatment process flow diagrams. *Journal of Environmental Management*, 112, 384-391.
- GENTILE, J. H., HARWELL, M. A., CROPPER, J. W., HARWELL, C. C., DEANGELIS, D., DAVIS, S., OGDEN, J. C. y LIRMAN, D. (2001). Ecological conceptual models: a framework and case study on ecosystem management for South Florida sustainability. *The Science of the Total Environment*, 274, 231-253.
- GERTSEVA, V. V. y GERTSEV, V. I. (2006). A conceptual model of fish functional relationship in marine ecosystems and its application for fisheries stock assessment. *Fisheries Research*, 81, 9-14.
- GHAEMI, P., SWIFT, J., SISTER, C., WILSON, J. P. y WOLCH, J. (2009). Design and implementation of a web-based platform to support interactive environmental planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, in press, 10.
- GIBERT, K., RODRÍGUEZ-SILVA, G. y RODRÍGUEZ-RODA, I. (2010). Knowledge Discovery with Clustering Based on Rules by States: A Water Treatment Application. *Environmental Modelling & Software*, 25, 712-723.
- GIORDANO, R., LIERSCH, S., VURRO, M. y HIRSCH, D. (2010). Integrating local and technical knowledge to support soil salinity monitoring in the Amudarya river basin. *Journal of Environmental Management*, 91, 1718-1729.
- GIUPPONI, C. (2007). Decision support systems for implementing the European Water Framework Directive: The MULINO approach. *Environmental Modelling & Software*, 22, 248-259.
- GIUPPONI, C., MYSIK, J. y FASSIO, A. (2004). An Integrated Assessment Framework for Water Resources Management: A DSS Tool and a Pilot Study Application. *Natural Resources Management (NMR)*. Fondazione Eni Enrico Mattei.
- GIUPPONI, C. y VLADIMIROVA, I. (2006). Ag-PIE: A GIS-based screening model for assessing agricultural pressures and impacts on water quality on a European scale. *Science of the Total Environment*, 359, 57-76.
- GOBIN, A., JONES, R., KIRKBY, M., CAMPLING, P., GOVERS, G., KOSMAS, C. y GENTILE, A. R. (2004). Indicators for pan-European assessment and monitoring of soil erosion by water. *Environmental Science & Policy*, 7, 25-38.
- GÓMEZ, T. M. (2005). Política fiscal para la gestión ambiental en Colombia, Santiago de Chile, CEPAL, 84.
- GONZÁLEZ, H. J. D., CARVAJAL, S. L. F. y FRANCISCO, M. T. N. (2012). Un índice de calidad de agua basado en lógica difusa, aplicado a la cuenca hidrográfica del río Aburrá, en la Jurisdicción del área metropolitana. *Dyna*, 171, 50-58.
- GONZALEZ, J. A. y CHAKRABORTY, S. (2014). Expatriate knowledge utilization and MNE performance: A multilevel framework. *Human Resource Management Review*, Article in press.
- GOTTSCALK, P. (2006). Stages of knowledge management systems in police investigations. *Knowledge-Based System*, 19, 381-387.
- GOURBESVILLE, P. (2008). Integrated river basin management, ICT and DSS: Challenges and needs. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, 312-321.

- GRANIZO, T. y ZUÑIGA, M. E. (eds.) 2007. Desafíos de las agendas de conservación y energía en las áreas protegidas en América Latina y el Caribe, Santiago de Chile: Serie de Documentos Técnicos de Asuntos Externos No. 2. The Nature Conservancy. (TNC).
- GUAITA, G. N. y JIMÉNEZ, H. L. M. (2008). Agua y sostenibilidad. *Índice*, 14, 14-17.
- GUHL, N. E. (2010). Prólogo. , Santiago de Cali, Universidad del Valle.
- GWP y INBO (2009). A handbook for integrated water resources management in basins, Suiza, Global Water Partnership and International Network of Basin Organizations, 104.
- HARDING, R. J., WEEDON, G. P., VAN LANEN, H. A. J. y CLARK, D. B. (2014). The future for global water assessment. *Journal of Hydrology*, article in press.
- HARMANCIOGLU, N. B., FEDRA, K. y BARBAROS, F. (2008). Analysis for sustainability in management of water scarce basin: the case of the Gediz River Basin in Turkey. *Desalination*, 226, 175-183.
- HE, J. (2013). Mixture model based multivariate statistical analysis of multiply censored environmental data. *Advances in Water Resource*, 59, 15-24.
- HILL, M. C., FAUNT, C. C., BELCHER, W. R., SWEETKIND, D. S., TIEDEMAN, C. R. y KAVETSKI, D. (2013). Knowledge, transparency, and refutability in groundwater models, an example from the Death Valley regional groundwater flow system. *Physics and Chemistry of the Earth*, 64, 105-116.
- HNEIF, M. y HOCK OW, S. (2009). Review of agile methodologies in software development. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 1, 1-8.
- HUANG, H.-C. (2009). Designing a knowledge-based system for strategic planning: A balanced scorecard perspective. *Expert Systems with Applications*, 36, 209-218.
- HUGHEY, K. F. D., CULLEN, R., KERR, G. N. y COOK, A. J. (2004). Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment. *Journal of Environmental Management*, 70, 85-93.
- IACOB, V.-S. (2013). The wastewater - a problem of integrated urban water management. *Procedia Economics and Finance*, 6, 436-443.
- ICP (2008). Sistema Nacional Ambiental. Mesa de Expertos, Bogotá. Colombia, Instituto de Ciencia Política. Observatorio Legislativo, 4.
- IDEAM (2001). Estudio Nacional del Agua. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá. Colombia.*
- IDEAM (2004). Guía Técnico Científica para la Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas en Colombia. (Decreto 1729 de 2002). *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá.*, 100.
- IDEAM (2007). Guía técnico científica para la ordenación de las cuencas hidrográficas en Colombia. Decreto 1729 de 2002. Segunda versión., Bogotá. Colombia, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, con el apoyo de: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 154.
- IDEAM (2008). Segunda comunicación nacional de Colombia ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Inventario nacional de gases efecto invernadero - Años 2000 y 2004, Bogotá, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 14.
- IDEAM (2009). Guía para la ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas en Colombia, Bogotá. Colombia, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 30.
- IDEAM (2010). Guía para la ordenación y manejo de cuencas hidrográficas en Colombia. Segunda Versión, Bogotá. Colombia, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM (2014). Consultoría para la planeación de microcuencas en el país, Bogotá, Colombia, Subdirección de Estudios Ambientales -IDEAM.
- INDIJ, D., DONIN, G. y LEONE, A. (2011). Gestión de los recursos hídricos en América Latina: Análisis de los actores y sus necesidades de desarrollo de capacidades, Italia, Unión Europea, European Commission Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 69.
- ISLAM, A. S. y PIASECKI, M. (2008). Ontology based web simulation system for hydrodynamic modeling. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16, 14.

- ISLAM, N., SADIQ, R., RODRIGUEZ, M. J. y FRANCISQUE, A. (2013). Evaluation of source water protection strategies: A fuzzy-based model. *Journal of Environmental Management*, 121, 191-201.
- JAIME, A., YAMILE ADRIANA (2008). Manejo del Conocimiento como Apoyo a los Sistemas de Trabajo Colaborativo. Estado del Arte. *Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.*, 1-12.
- JARA-ROJAS, R., BRAVO-URETA, B. E., ENGLER, A. y DÍAZ, J. (2013). An analysis of the joint adoption of water conservation and soil conservation in Central Chile. *Land Use Policy*, 32, 292-301.
- JIMÉNEZ, F. (2005). Gestión integral de cuencas hidrográficas. Enfoques y estrategias actuales, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. CATIE, 4.
- JIMÉNEZ, F. (2008). Introducción al manejo, gestión y cogestión de cuencas hidrográficas, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, 40.
- JUWANA, I., MUTTIL, N. y PERERA, B. J. C. (2012). Indicator-based water sustainability assessment — A review. *Science of the Total Environment*, 438, 357-371.
- KAEWBOONMA, N., TUAMSUK, K. y KANARKARD, W. (2013a). Knowledge acquisition for the design of flood management information system: Chi River Basin, Thailand. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 73, 109-114.
- KAEWBOONMA, N., TUAMSUK, K. y KANARKARD, W. (2013b). Knowledge acquisition for the design of flood management information system: Chi river basin, Thailand. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 73, 109-114.
- KAIN, J.-H. y SÖDERBERG, H. (2008). Management of complex knowledge in planning for sustainable development: The use of multi-criteria decision aids. *Environmental Impact Assessment Review*, 28, 15.
- KARMAKAR, S., LAGUE, C., AGNEW, J. y LANDRY, H. (2007). Integrated decision support system (DSS) for mature management: A review and perspective. *Computers and electronics in agriculture*, 57, 12.
- KIM, Y. y CHUNG, E.-S. (2014). An index-based robust decision making framework for watershed management in a changing climate. *Science of the Total Environment*, 473, 88-102.
- KIM, Y., CHUNG, E.-S., JUN, S.-M. y KIM, S. U. (2013). Prioritizing the best sites for treated wastewater instream use in an urban watershed using fuzzy TOPSIS. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, 23-32.
- KOONTZ, T. M. y NEWIG, J. (2014). Cross-level information and influence in mandated participatory planning: Alternative pathways to sustainable water management in Germany's implementation of the EU Water Framework Directive. *Land Use Policy*, 38, 594-604.
- LARSEN, B. (2004). Cost of environmental damage: A socio-economic and environmental health risk assessment. Final report. Colombia, Bogotá, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 74.
- LAUTENBACH, S., BERLEKAMP, J., GRAF, N., SEPPELT, R. y MATTHIES, M. (2009). Scenario analysis and management options for sustainable river basin management: Application of the Elbe DSS. *Environmental Modelling & Software*, 24, 26-43.
- LE BARS, M. y LE GRUSSE, P. (2008). Use of decision support system and a simulation game to help collective decision-making in water management. *Computer and electronics in agriculture*, 62, 182-189.
- LEE, K. S. y CHUNG, E.-S. (2007). Development of integrated watershed management schemes for an intensively urbanized region in Korea. *Journal of Hydro-environment Research*, 1, 95-109.
- LEE, K. S., CHUNG, E.-S. y KIM, Y.-O. (2008a). Integrated watershed management for mitigating streamflow depletion in an urbanized watershed in Korea. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34, 889-899.
- LEE, T.-Z., WU, C.-H. y WEI, H.-H. (2008b). KBS_{LUA}: A knowledge-based system applied in river land use assessment. *Expert Systems with Applications*, 33, 11.

- LEÓN, S. T. (2001). Relaciones agricultura-ambiente en la degradación de tierras en Colombia, Bogotá, Colombia, Instituto de Estudios Ambientales. IDEA. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá, 15.
- LERMONTOV, A., YOKOYAMA, L., LERMONTOV, M. y MACHADO, M. A. S. (2009). River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil. *Ecological Indicators*, 9, 1188-1197.
- LI, D., FU, Z. y DUAN, Y. (2002). Fish-Expert: a web-based expert system for fish disease diagnosis. *Expert Systems with Applications*, 23, 10.
- LI, X.-Y., CHAU, K. W., CHENG, C.-T. y LI, Y. S. (2006). A Web-based flood forecasting system for Shuangpai region. *Avances in Engineering Software*, 37, 13.
- LI, Y. P., HUANG, G. H. y NIE, S. L. (2010). Planning water resources management systems using a fuzzy-boundary interval-stochastic programming method. *Advances in Water Resources*, 33, 1105-1117.
- LIAO, S.-H. (2005). Expert system methodologies and applications - a decade review from 1995 to 2005. *Expert Systems with Applications*, 28, 11.
- LÓPEZ, D. C. E. (2000). Análisis y propuesta integral para la operatividad del sistema nacional ambiental - SINA, Bogotá, Tesis. Facultad de Ciencias Jurídicas. Pontificia Universidad Javeriana, 452.
- LÓPEZ, E. M., GARCÍA, M., SCHUHMACHER, M. y DOMINGO, J. L. (2008). A fuzzy expert system for soil characterization. *Environment International*, 34, 950-958.
- LLORENS, E., COMAS, J., MARTÍ, E., RIERA, J. L. y SABATER, F. (2009). Integrating empirical and heuristic knowledge in a KBS to approach stream eutrophication. *Ecological Modelling*, In press, 11.
- MADS (2013). Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas, Bogotá. Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico, 116.
- MAKROPOULOS, C. K., NATSIS, K., LIU, S., MITTAS, K. y BUTLER, D. (2008). Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management. *Environmental Modelling & Software*, 23, 1448-1460.
- MALAGÓN, C. D. (1998). El recurso suelo en Colombia. Inventario y problemática. *Ciencias de la Tierra*, XXII, 13-51.
- MANCE, H. (2007). El ascenso y declive del Ministerio del Medio Ambiente. 1993-2006. *Foro Nacional Ambiental. Documento de Políticas Públicas*, 11.
- MANGI, S. C., ROBERTS, C. M. y RODWELL, L. D. (2007). Reef fisheries management in Kenya: Preliminary approach using the driver-pressure-state-impacts-response (DPSIR) scheme of indicators. *Ocean & Coastal Management*, 50, 463-480.
- MANOLIADIS, O. G. (2002). Development of ecological indicators- a methodological framework using compromise programming. *Ecological Indicators*, 2, 169-176.
- MARCÉN, C. A. (2003). Aportaciones desde la escuela a la nueva cultura del agua, Alicante. España, Congreso Agua y Educación Ambiental: Nuevas propuestas para la acción. CAM, 287.
- MARÍN, C., MARÍA ISABEL (2004). Metodología para la gestión integrada de la calidad del agua de la microcuenca El Chocho, Santiago de Cali, Colombia, Universidad del Valle, 165.
- MÁRQUEZ, F. D. (2003). De la teoría a la práctica en educación ambiental: el caso del agua. Ponencia marco, Alicante. España, Congreso Agua y Educación Ambiental: Nuevas propuestas para la acción. CAM, 287.
- MARTIN, J. C. y TOLL, D. G. (2006). The development of a knowledge-based system for the preliminary investigation of contaminated land. *Computers and Geotechnics*, 33, 93-107.
- MARTÍNEZ, C. P. C. (2006). El método de estudio de caso. Estrategia metodológica de la investigación científica. *Pensamiento & gestión. Universidad del Norte.*, 20, 165-193.
- MARTÍNEZ, F., JULIA (2005). Agua y sostenibilidad: algunas claves desde los sistemas aridos. *Departamento de Ecología e Hidrología. Universidad de Murcia. España.*
- MARTÍNEZ, P. A. (2007). El agua como fuente de conflictos. Estudio de la cuenca del Orinoco, Barcelona, 301.

- MARTINS, J. H., CAMANCHO, A. S. y GASPAR, M. B. (2012). A review of the application of driving forces -Pressure-State-Impact-Response framework to fisheries management. *Ocean & Coastal Management*, 69, 273-281.
- MATTHIES, M., BERLEKAMP, J., LAUTENBACH, S., GRAF, N. y REIMER, S. (2006). System analysis of water quality management for the Elbe river basin. *Environmental Modelling & Software*, 21, 10.
- MATTHIES, M., GIUPPONI, C. y OSTENDORFT, B. (2007). Environmental decision support systems: Current issues, methods and tools. *Environmental Modelling & Software*, 22, 123-127.
- MAVDT (2003). Educación Ambiental. Política Nacional, Bogotá, Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT ; Ministerio de Educación Nacional - MEN, 122.
- MAVDT (2010a). Política de prevención y control de la contaminación del aire, Bogotá, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 48.
- MAVDT (2010b). Política nacional de producción y consumo sostenible. "Hacia una cultura de consumo sostenible y transformación productiva". *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Viceministerio de Ambiente. Dirección de Desarrollo Sectorial Sostenible. República de Colombia.*
- MAVDT (2010c). Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico, Bogotá. Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Viceministerio de Ambiente. Dirección de Ecosistemas. Grupo de Recurso Hídrico, 120.
- MAYER, A., WINKLER, R. y FRY, L. (2014). Classification of watersheds into integrated social and biophysical indicators with clustering analysis. *Ecological Indicators*, 45, 340-349.
- MEROT, A. y BERGEZ, J.-E. (2010). IRRIGATE: A dynamic integrated model combining a knowledge-based model and mechanistic biophysical models for border irrigation management. *Environmental Modelling & Software*, 25, 421-432.
- MERRITT, W. S., CROKE, B. F. W., JAKEMAN, A. J., LETCHER, R. A. y PEREZ, P. (2004). A biophysical toolbox for assessment and management of land and water resources in rural catchments in Northern Thailand. *Ecological Modelling*, 171, 279-300.
- MIAH, S. J., KERR, D., GAMMACK, J. y COWAN, T. (2008). A generic design environment for the rural industry knowledge acquisition. *Knowledge-Based System*, 21, 892-899.
- MILANO, M., RUELLAND, D., DEZETTER, A., FABRE, J. y ARDOIN-BARDIN, S. (2013). Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*, 500, 114-126.
- MMA (2002). Decreto 1729 de 2002. *Ministerio del Medio Ambiente. Bogotá. Colombia.*
- MOMBLANCH, A., PAREDES-ARQUIOLA, J., MUNNÉ, A., MANZANO, A., ARNAU, J. y ANDREU, J. (2014). Managing water quality under drought conditions in the Llobregat River Basin. *Science of the Total Environment*, Article in press.
- MORÁN, ALBERTO E. y BIANCHI, GUSTAVO F. (2005). Toma de decisiones ambientales: apuntes para un marco conceptual y metodológico. *Universidad Nacional de General San Martín. Cátedra Unesco Cousteau en Ecotecnía. Buenos Aires. Argentina.*
- MORENO, D. A., RENNERT, I. y (EDITORES) (2007). Gestión Integral de Cuencas. La Experiencia del Proyecto Regional Cuencas Andinas. *Centro Internacional de la Papa, Perú.*
- NACIONES UNIDAS (2008). Preparación ante los desastres para una respuesta eficaz. Conjunto de directrices e indicadores para la aplicación de la prioridad 5 del Marco de Acción de Hyogo. *Naciones Unidas. Ginebra. Suiza.*
- NANNETTIE, E. G. (2003). El futuro del Agua Equidad, Desarrollo y Sostenibilidad. *Instituto para el Desarrollo Sostenible "Quinaxi"*, Web page visitada www.quinaxi.org. Sep 2008.
- OCAMPO-DUQUE, W., OSORIO, C., PIAMBA, C., SCHUHMACHER, M. y DOMINGO, J. L. (2013). Water quality analysis in rivers with non-parametric probability distributions and fuzzy inference systems: Application to the Cauca River, Colombia. *Environment International*, 52, 17-28.
- OECD (1998). Towards sustainable development. Environmental Indicators, Red de Desarrollo Sostenible - PNUD.
- OECD (2004). Key environmental indicators, Paris, Francia, Environment Directorate.

- OJEDA, B. E. O. y ARIAS, U., RAÚL (2000). Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Colombia., Bogotá. Colombia.
- OLIVER, D. M., FISH, R. D., WINTER, M., HODGSON, C. J. y HEATHWAITE, A. L. (2012). Valuing local knowledge as a source of expert data: Farmer engagement and the design of decision support systems. *Environmental Modelling & Software*, 36, 76-85.
- OMM y PNUMA (2008). El cambio climático y el agua Ginebra, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 212.
- OMS (2003). Agua y cultura. Decenio internacional del agua 2005-2015, Paris, Organización Mundial de la Salud, 3.
- OVALLES, Y., MÉNDEZ, V. E. y RAMÍREZ, G. (2008). Ordenación de cuencas hidrográficas. Un reto al conocimiento, la acción y la gestión. *Revista Forestal Venezolana*, 52 (2), 241-252.
- PARDO, BUENDÍA, MERCEDES (2003). Educación ambiental sobre el agua: planes estratégicos. *Congreso Agua y Educación Ambiental: Nuevas propuestas para la acción*. CAM. Alicante. España.
- PARRA, OSCAR (2009). Gestión integrada de cuencas hidrográficas (Documento introductorio). *Centro de Ciencias Ambientales, EULA. Universidad de Concepción. Chile*.
- PEÑA-VENEGAS, C. P. y VANEGAS, C. G. I. (2010). Dinámica de los suelos amazónicos: Procesos de degradación y alternativas para su recuperación, Bogotá. Coombia, Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas -Sinchi. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial.
- PEÑA, A. A. (2006). Sistemas Basados en Conocimiento: Una Base para su Concepción y Desarrollo. *Instituto Politécnico de Nacional. México*.
- PÉREZ, M. A., PEÑA, M. R. y ALVAREZ, P. (2011). Agro-industria cañera y uso del agua: análisis crítico en el contexto de la política de agrocombustibles en Colombia. *Ambiente & Sociedad*, XIV, 153-178.
- PÉREZ, R., MARIO ALEJANDRO y ROJAS, JOHNNY HAROLD. (2008). Hacia el desarrollo sostenible en Colombia. *Universidad del Valle. Instituto Cinara. Cali. Colombia*.
- PÉREZ, R. M., ROJAS, P. J. y ORDOÑEZ, B. C. (2010). Política Ambiental para el Desarrollo Sostenible en Colombia, Santiago de Cali. Colombia, Universidad del Valle.
- PERROT, B. E. (2007). A strategic risk approach to knowledge management. *Business Horizons*, 50, 523-533.
- PHILIP, R. (2011). Gestión integral del agua urbana para la ciudad del futuro. Kit de capacitación SWITH. Módulo 1. Planeación estratégica. Preparándose para el futuro., EU, ICLEI. Local Governments for Sustainability, European Secretariat, 54.
- PHILLIS, Y. A. y ANDRIANTIATSAHOLINIAINA, L. A. (2001). Sustainability: an ill-defined concept and its assessment using fuzzy logic. *Ecological Economics*, 37, 435-456.
- PHILLIS, Y. A., GRIGORODIS, E. y KOUIKOGLU, V. S. (2011). Sustainability ranking and improvement of countries. *Ecological Economics*, 70, 542-553.
- PNUD (2006). Informe sobre Desarrollo Humano 2006. Mas Allá de la Escasez. Poder, Pobreza y la Crisis Mundial del Agua *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. New York. EE.UU.*
- PNUMA (2001). Manual de manejo de cuencas, Costa Rica, World Vision, 154.
- PNUMA (2005). Guía para la planificación estratégica sostenible local (Agenda 21 Local): eslabón básico para superar la pobreza, México, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Oficina Regional para América Latina y el Caribe, 65.
- PNUMA (2006). Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. *Estrategia y política del agua del PNUMA*.
- POSTGRESQL. 2013. www.postgresql.org.es [Online]. [Accessed Agosto 2013].
- PRIETO, B. C. J. (2004). El agua: Sus Formas, Efectos, Abastecimientos, Usos, Daños, Control y Conservación. *Ecoe Ediciones. Bogotá. Colombia*.
- QUINAXI (2007). Gestión integrada del recurso hídrico en Colombia, Bogotá. Colombia, Corcas Editores Ltda., 59.

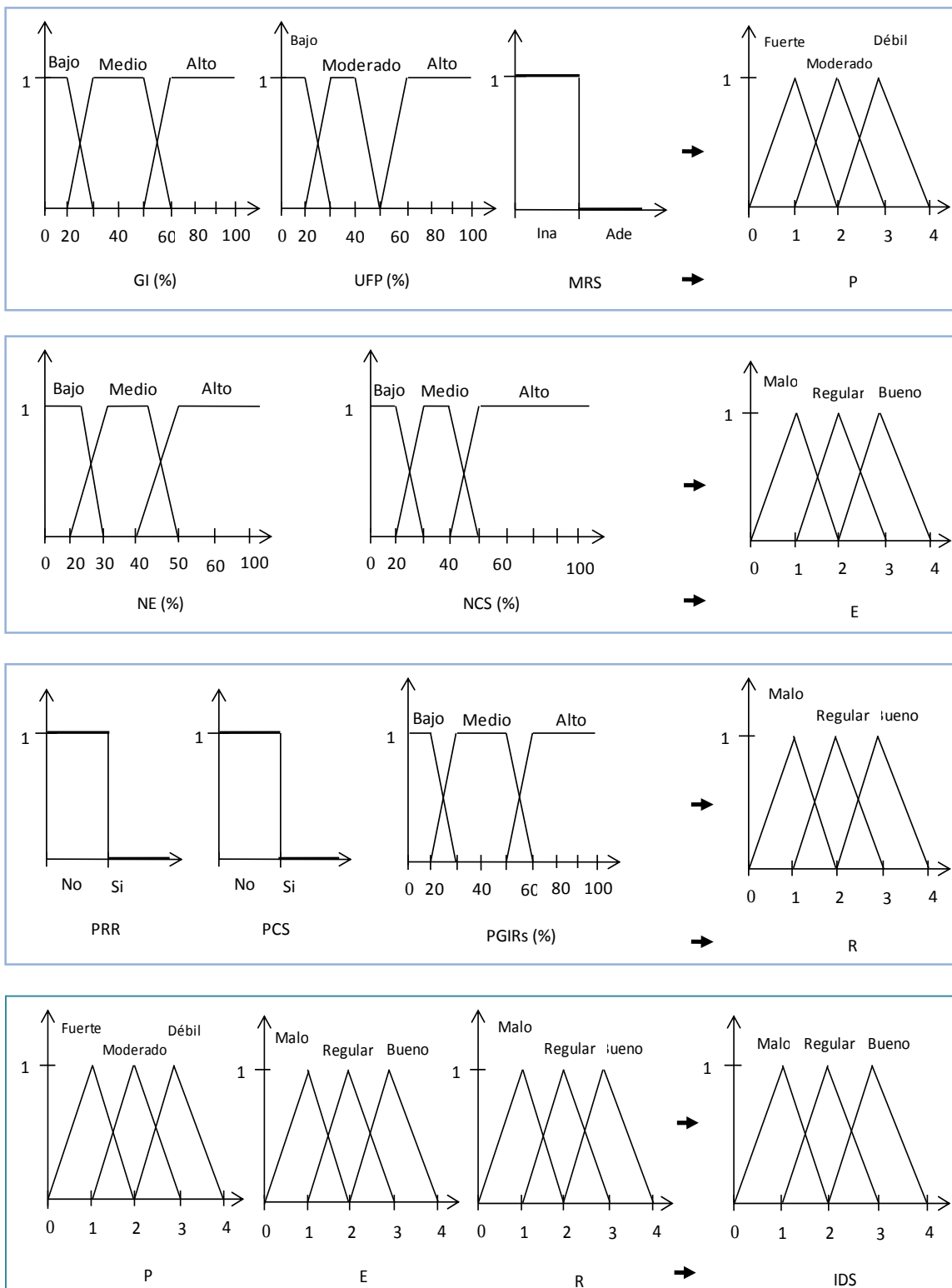
- QUINTERO, A., KONARÉ, D. y PIERRE, S. (2005). Prototyping an intelligent decision support system for improving urban infrastructures management. *European Journal of Operational Research.*, 162, 654-672.
- RAO, M., FAN, G., THOMAS, J., CHERIAN, G., CHUDIWALE, V. y AWAWDEH, M. (2007). A web-based GIS Decision Support System for managing and planning USDA's Conservation Reserve Program (CRP). *Environmental Modelling & Software*, 22, 10.
- REFSGAARD, J. C. y HENRIKSEN, H. J. (2004). Modelling guidelines - terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources* 27, 71-82.
- REITER, M. A., SAINTIL, M., YANG, Z. y POKRAJAC, D. (2009). Derivation of a GIS-based watershed-scale conceptual model for the St. Jones River Delaware from habitat-scale conceptual models. *Journal of Environmental Management*, 90, 3253-3265.
- RESHMIDEVI, T. V., ELDHO, T. I. y JANA, R. (2009). A GIS-integrated fuzzy rule-based inference system for land suitability evaluation in agricultural watersheds. *Agricultural Systems*, 101, 101-109.
- RESTREPO, S. J. C. (2010). Una política integral de tierras para Colombia, Bogotá, Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 23.
- REYES-MENDY, F., ARRIAGADA, R. A., REYES-PAECKE, S. y TOBAR, A. (2014). Policy statement coherence: A methodological proposal to assess environmental public policies applied to water in Chile. *Environmental Science & Policy*, 42, 169-180.
- RODRÍGUEZ, G., DAVID (2006). Modelos para la Creación y Gestión del Conocimiento: Una Aproximación Teórica. *Educación*, 37, 25-39.
- ROGERS, J. W. y LOUIS, G. E. (2009). Conceptualization of a robust performance assessment and evaluation model for consolidating community water systems. *Journal of Environmental Management*, 90, 12.
- ROJAS, H. R. (2011). Prototipo de un sistema de soporte a decisiones para la planeación y gestión de cuencas hidrográficas, Santiago de Cali, Colombia, Tesis de pregrado en Ingeniería de Sistemas. Universidad del Valle 54.
- ROMAÑA, D., JOSÉ ALBERTO. (2006). Análisis prospectivo de la microcuenca la Piedrahíta, Municipio de Donmatías, como instrumento de planificación del territorio. Ingeniero Ambiental Pregrado, Universidad de Medellín.
- RÖPKE, B., BACH, M. y FREDE, H.-G. (2004). DRIPS- a DSS for estimating the input quantity of pesticides for German river basins. *Environmental Modelling & Software*, 19, 1021-1028.
- ROUHANI, S. y KANGARI, R. (1987). Expert systems in water resource. *Water for the Future : Hydrology in Perspective*, 164, 457-462.
- RUDAS, L. G. (2005). Comentarios sobre concesiones y permisos, tasas ambientales e instrumentos financieros en la legislación del agua. *Policy paper*, 6, 1-8.
- SAID, A., SEHLKE, G., STEVENS, D. K., GLOVER, T., SORENSEN, D., WALKER, W. y HARDY, T. (2006). Exploring an innovative watershed management approach: From feasibility to sustainability. *Energy*, 31, 2373-2386.
- SALEWICZ, K. A. y NAKAYAMA, M. (2004). Development of a web-based decision support system (DSS) for managing large international rivers. *Global Environmental Change*, 14, 12.
- SALOMÓN, M., GUAMAN, R. C., RUBIO, C., GALAÁRRAGA, R. y ABRAHAM, E. (2008). Indicadores de uso del agua en una zona de los Andes centrales de Ecuador. Estudio de la cuenca del Río Ambato. *Ecosistemas*, 17, 72-85.
- SÁNCHEZ, L. D. y SÁNCHEZ, T., ARLEZ (2004). Uso eficiente del agua, Delft, Países Bajos, International Water and Sanitation Centre-IRC, 76.
- SÁNCHEZ, P., GERMAN (2002). Desarrollo y medio ambiente: una mirada a Colombia. *Economía y Desarrollo* 1, 79-98.
- SAUNDERS, M. C., SULLIVAN, T. J., NASH, B. L., TONNESSEN, K. A. y MILLER, B. J. (2005). A Knowledge-based approach for classifying lake water chemistry. *Knowledge-Based Systems*, 18, 8.

- SCHOLTEN, L., SCHEIDEGGER, A., REICHERT, P. y MAURER, M. (2013). Combining expert knowledge and local data for improved service life modeling of water supply networks. *Environmental Modelling & Software*, 42, 1-16.
- SEMARNAT (2011). Estrategia nacional de producción y consumo sustentable, México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 174.
- SEMARNAT (2012). Indicadores básicos del desempeño ambiental de México 2010, Tlalpan, México D.F., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 129.
- SHEN, J., PARKER, A. y RIVERSON, J. (2005). A new approach for a Windows-based watershed modeling system based on a database-supporting architecture. *Environmental Modelling & Software*, 20, 1127-1138.
- SILVA, A. S. M. y CORREA, R. F. J. (2009). Analisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*, 12, 13-34.
- SINA (2002). Política nacional de educación ambiental, Bogotá. Colombia, Ministerio del Medio Ambiente y Ministerior de Educación Nacional, 69.
- SULIS, A. y SECHI, G., M. (2013). Comparison of generic simulation models for water resource systems. *Environmental Modelling & Software*, 40, 214-225.
- SULLIVAN, T. J., SAUNDERS, M. C., TONNESSEN, K. A., NASH, B. L. y MILLER, B. J. (2005). Application of a regionalized knowledge-based model for classifying the impacts of nitrogen, sulfur, and organic acids on lakewater chemistry. *Knowledge-Based Systems*, 18, 14.
- SWIECH, T., ERTSEN, M. W. y MACHICAO, P. C. (2012). Estimating the impacts of a reservoir for improved water use in irrigation in the Yarabamba region, Peru. *Physics and Chemistry of the Earth*, 47-48, 64-75.
- TANAKA, T. (2008). Methodology of integrated watershed management for sustainable water resources use. *Proceedings of International Worshop on Integrated Watershed Management for Sustainable Water*, 2, 1-6.
- TEZER, A., SEN, O. L., AKSEHIRLI, I., CETIN, N. I. y ONUR, A. C. T. (2012). Integrated planning for the resilience of urban riverine ecosystems: the Istanbul-Omerli Watershed case. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 12, 153-163.
- TIAN, J.H., WANG, J.H., LIU, Z.C., LI, H.C., WANG, X.Z., XIE, D.Y., TIAN, Y.K., LIU, F.C: y YU, X.J. (2010). A conceptual ecological model of Cangzhou Coastal Wetlands, Hebei Province, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 1002-1011.
- TIBURAN, J. C., SAIZEN, I. y KOBAYASHI, S. (2013). Geospatial-based vulnerability assessment of an urban watershed. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 263-269.
- TORRES, S., LUIS CARLOS (2007). Inteligencia Artificial. Conceptos Básicos. , Bogotá. Colombia., Universidad Nacional de Colombia.
- UMATA-PNN-FUNVIVIR 2008. Conservación y mejoramiento de las condiciones de sostenibilidad de la oferta hídrica en la zona rural del municipio de Santiago de Cali. Santiago de Cali, Colombia: Alcaldia Municipal de Santiago de Cali, Unidad de Asistencia Técnica Agropecuaria (UMATA), Fundación para la vida en comunidad vivir (FUNVIVIR), Parques Nacionales Naturales (PNN).
- UN-WATER (2009). Aguas Comunes. Oportunidades Compartidas. *Día Mundial del Agua 2009*.
- UNESCO-WWAP (2003). Agua para todos, agua para la vida, Paris, Francia, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 604.
- UNIVALLE (2009). Tendencia eje desarrollo territorial y medio ambiente. Proyecto Cali Vision 2036, Santiago de Cali, Colombia, Universidad del Valle - Alcaldía Municipal de Santiago de Cali, 47.
- VALDÉS-PINEDA, R., PIZARRO, R., CGARCÍA-CHEVESICH, P., VALDÉS, J. B., OLIVARES, C., VERA, M., BALOCCHI, F., PÉREZ, F., VALLEJOS, C., FUENTES, R., ABARZA, A. y HELWIG, B. (2014). Water governace in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, article in press.
- VALENZUELA, M. L. M. y MATARÁN, R. A. (2008). Environmental indicators to evaluate spatial and water planning in the coast of Granada (Spain). *Land Use Policy*, 25, 95-105.

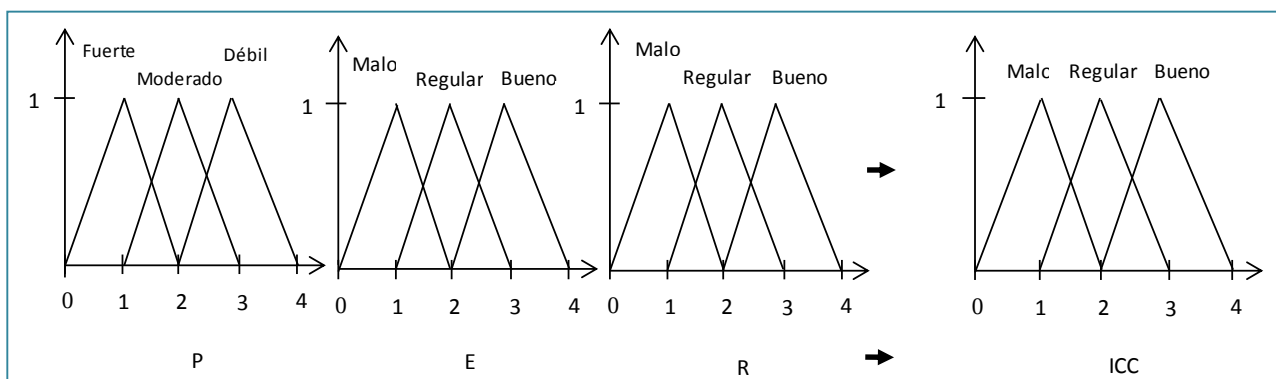
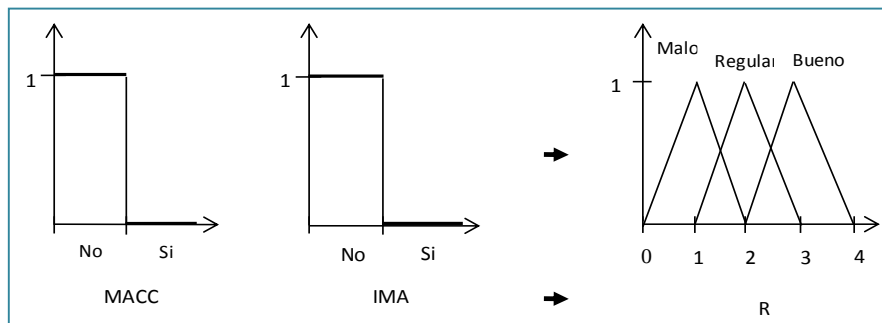
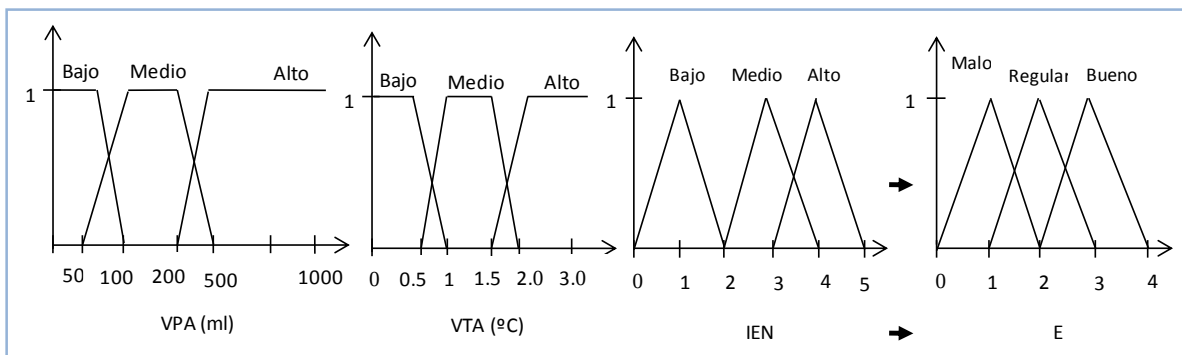
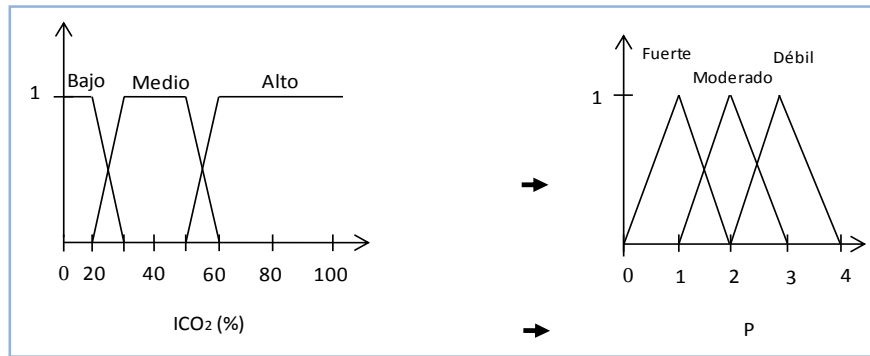
- VAN DELDEN, H., SEPPELT, R., WHITE, R. y JAKEMAN, A. J. (2011). A methodology for the design and development of integrated models for policy support. *Environmental Modelling & Software*, 26, 266-279.
- VICTORIA, F. B., VIEGAS FILHO, J. S., PEREIRA, L. S., TEIXEIRA, J. L. y LANNA, A. E. (2005). Multi-scale modeling for water resources planning and management in rural basins. *Agricultural water management*, 77, 4-20.
- VISHNUDAS, S., SAVENIJE, H. H. G., VAN DER ZAAG, P., AJITH KUMAR, C. E. y ANIL, K. R. (2008). Sustainability analysis of two participatory watershed projects in Kerala. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, 1-12.
- WAN, S. y LEI, T. C. (2009). A knowledge-based decision support system to analyze the debris-flow problems at Chen-Yu-Lan River, Taiwan. *Knowledge-Based Systems*, 22, 580-588.
- WANG, S. y ARIGUZO, G. (2004). Knowledge management through the development of information schema. *Information and Management*, 41, 445-456.
- WEN, Y.-F. (2009). An Effectiveness measurement model for knowledge management. *Knowledge-Based Systems*, 22, 363-367.
- WOLFSLEHNER, B. y VACIK, H. (2008). Evaluating sustainable forest management strategies with the Analytic Network Process in a Pressure-State-Response framework. *Journal of Environmental Management*, 88, 1-10.
- WRIGHT, S. A. L. y FRTSCH, O. (2011). Operationalising active involvement in the EU Water Framework Directive: Why, when and how? *Ecological Economics*, 70, 2268-2274.
- WWAP (2006). El agua, una Responsabilidad Compartida. 2do. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. . UNESCO.
- XERCAVINS, J., CERCANTES, D. C.-G. y SABATER, A. (2005). Desarrollo Sostenible. Aula Politécnica. Ciencia, Cultura y Sociedad. Ediciones UPC.
- YANG, B. y LI, M.-H. (2011). Assessing planning approaches by watershed streamflow modeling: Case study of The Woodlands; Texas. *Landscape and Urban Planning*, 99, 9-22.
- ZADEH, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338-353.
- ZALEWSKI, M. (2004). Ecohydrology as a system approach for sustainable water biodiversity and ecosystem services. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 4, 229-235.
- ZALEWSKI, M. (2010). Ecohydrology for implementation of the EU water framework directive. . *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water Management*, 11.
- ZENG, Y., CAI, Y., JIA, P. y JEE, H. (2012). Development of a web-based decision support system for supporting integrated water resources management in Daegu city, South Korea. *Expert Systems with Applications*, 39, 10091-10102.
- ZHANG, G. Z., ZHAO, W. N. y LIU, H. (2010). A gis-based decision support system for water trade management of river basin cities. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 650-655.
- ZHANG, Y., COLLINS, A. I., MURDOCH, N., LEE, D. y NADEN, P. S. (2014). Cross sector contributions to river pollution in England and Wales: Updating waterbody scale information to support policy delivery for the Water Framework Directive. *Environmental Science & Policy*, 42, 16-32.
- ZHAO, Z. y TAO, X. (2010). An application of fuzzy matter-element theory in land ecological safety evaluation. *IEEE*, 10, 629-633.
- ZHIYI, L. y YIXIN, Y. (2010). Fuzzy assessment of estuarine wetland health. *IEEE*, 9, 1-4.
- ZHU, A.-X., WANG, R., QIAO, J., QIN, C.-Z., CHEN, Y., LIU, J., DU, F., LIN, Y. y ZHU, T. (2014). An expert knowledge-based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic. *Geomorphology*, 214, 128-138.
- ZHU, X. y DALE, A. P. (2001). JavaAHP: a web-based decision analysis tool for natural resource and environmental management. *Environmental Modelling & Software*, 16, 11.
- ZNIDARSIC, M., BOHANEK, M. y ZUPAN, B. (2006). proDEX - A DSS tool for environmental decision-making. *Environmental Modelling & Software*, 21, 3.

9. ANEXOS

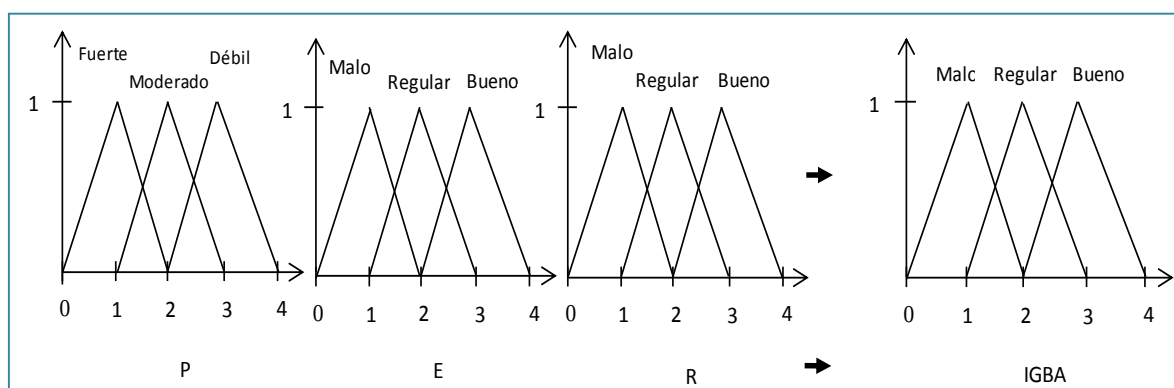
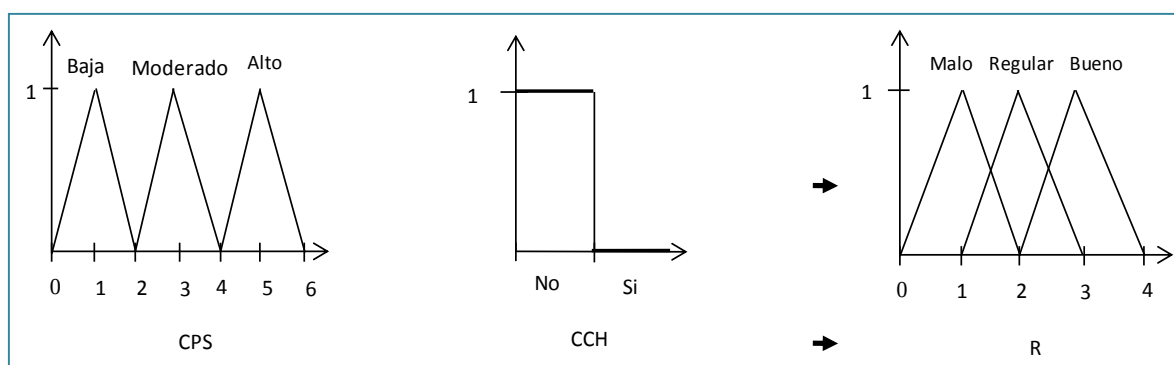
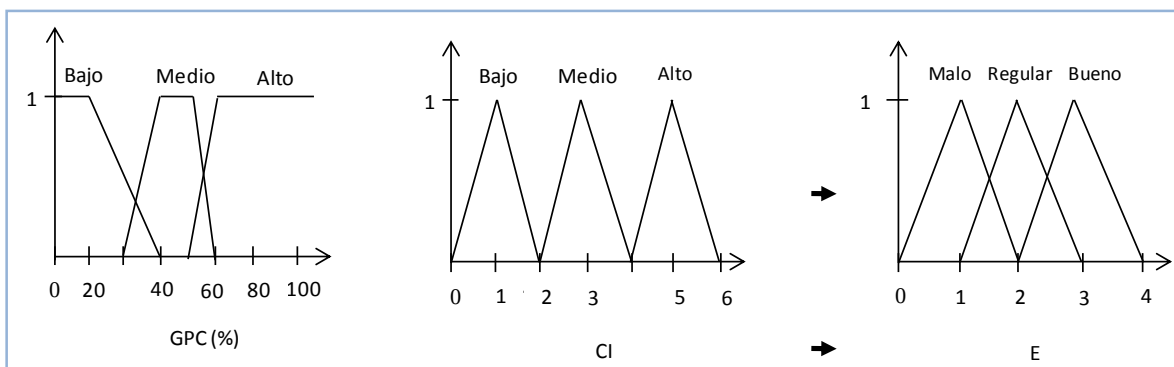
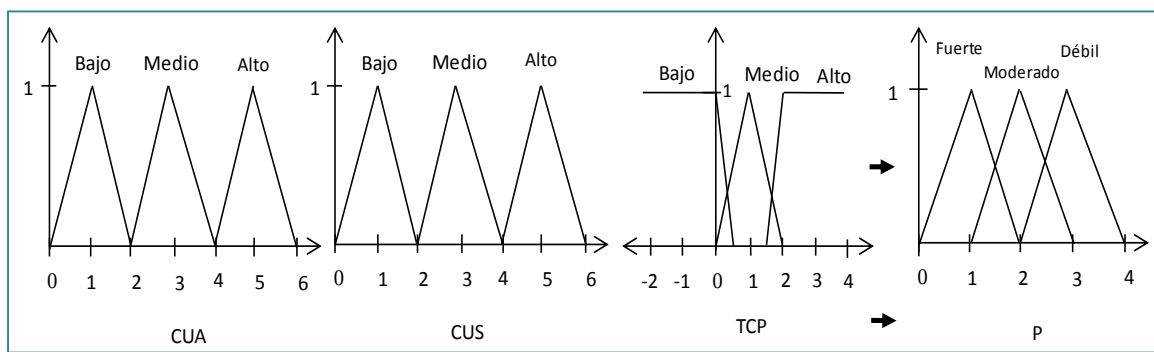
Anexo 4.1 Funciones de pertenencia de indicadores PER para el índice IDS.



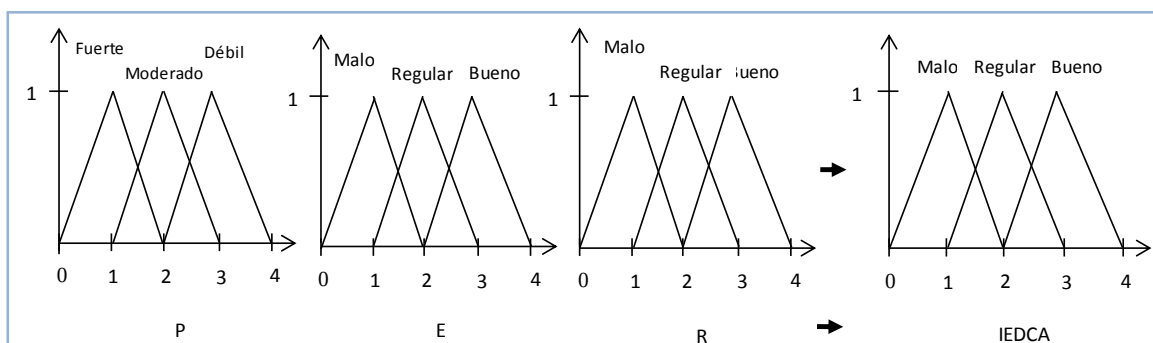
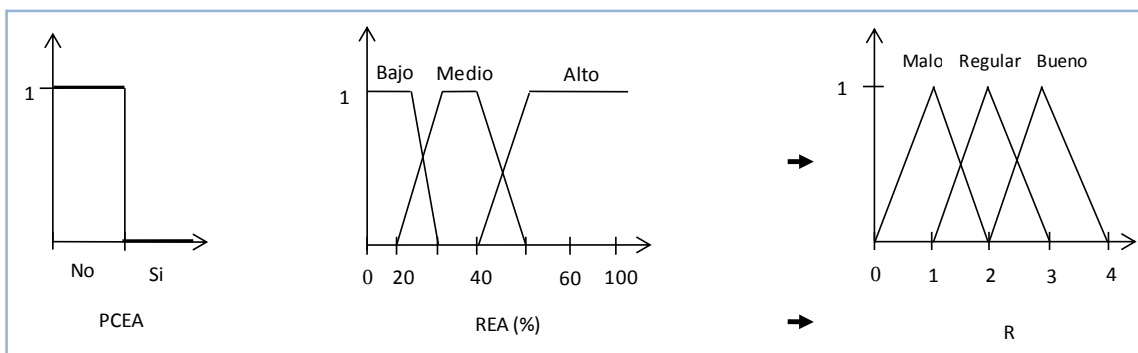
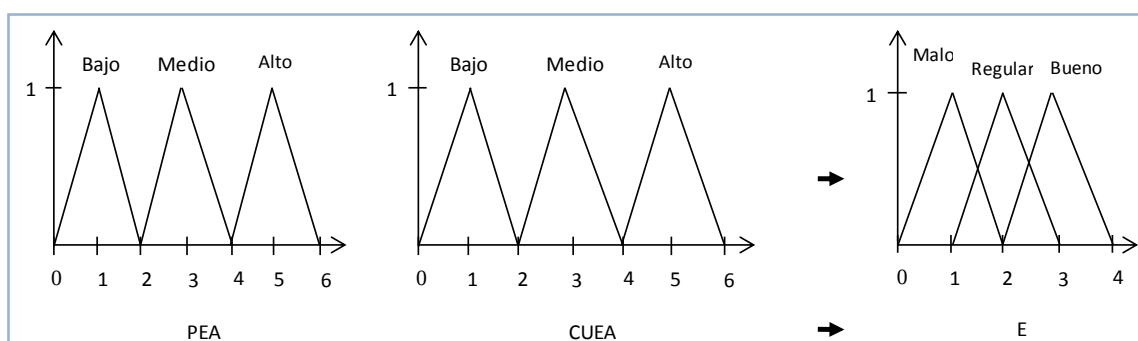
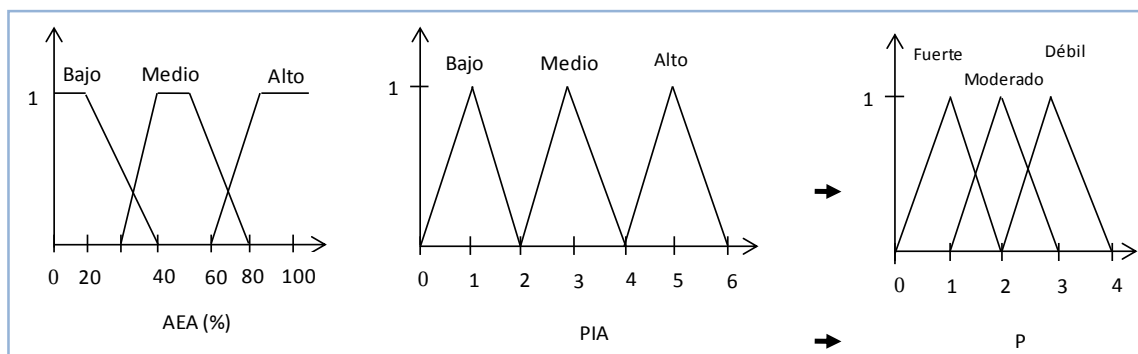
Anexo 4.2 Funciones de pertenencia de indicadores PER para el índice ICC.



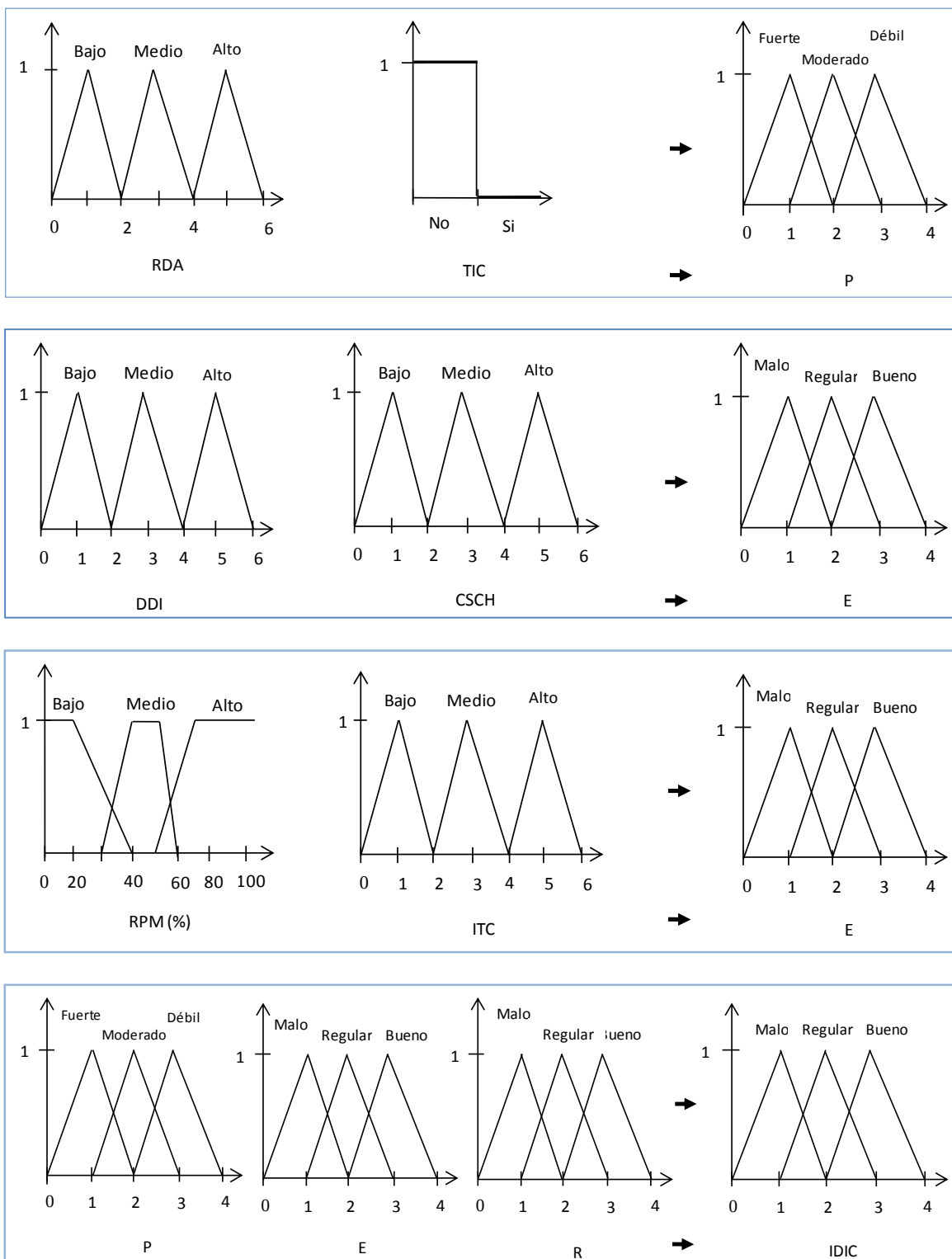
Anexo 4.3 Funciones de pertenencia de indicadores PER para el índice IGBA



Anexo 4.4 Funciones de pertenencia de indicadores PER para el índice IEDCA



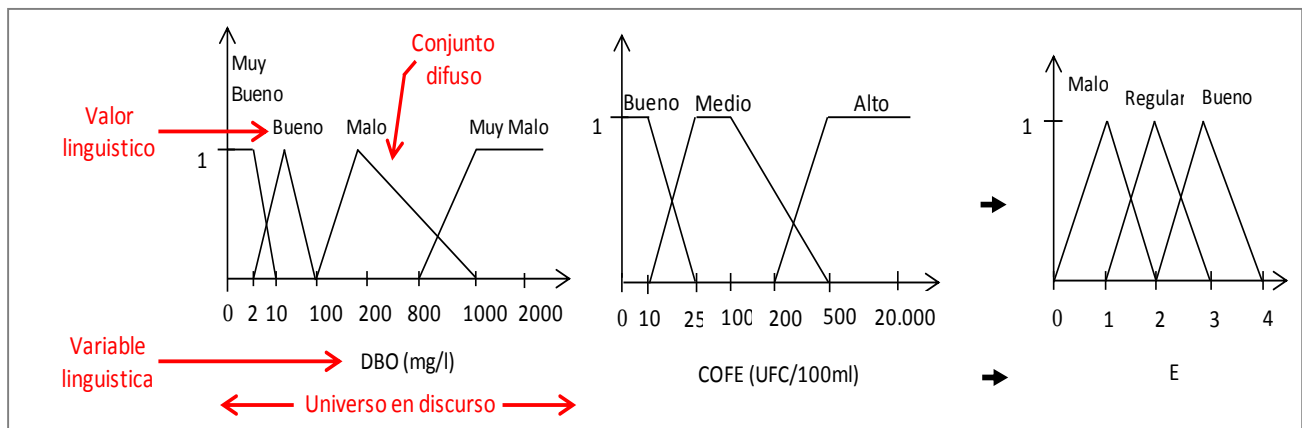
Anexo 4.5 Funciones de pertenencia de indicadores PER para el índice IDIC



Anexo 4.6 Ejemplo de cálculos del modelo de lógica difusa.

El siguiente ejemplo ilustra el proceso de razonamiento y cálculo usado en el modelo *cuencandina*, para generar el índice de estado (E), dentro del índice ICAsup.

El método consiste inicialmente en la definición de los indicadores y sus funciones de pertenencia, en este caso se definieron los indicadores, Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Coliformes Fecales (COFE), con las siguientes funciones de pertenencia:



A nivel matemático la variable lingüística DQO es un conjunto de funciones por partes, cada tramo representa una función, como se presenta a continuación.

$$DQO_1(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0 \\ 1 & \text{si } 0 < x \leq 2 \\ \frac{10-x}{8} & \text{si } 2 < x \leq 10 \\ 0 & \text{si } x \geq 2000 \end{cases}$$

Utilizando operadores mín y máx, la expresión anterior se puede expresar como sigue:

$$DQO_1(x) = \max \left(\min \left(1, \frac{10-x}{8} \right), 0 \right)$$

De igual forma las otras partes de la función DQO, se puede expresar como sigue:

$$DQO_2(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-2}{8}, \frac{100-x}{50}\right), 0\right)$$

$$DQO_3(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-100}{100}, \frac{1000-x}{800}\right), 0\right)$$

$$DQO_4(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-800}{200}, 1, \frac{2000-x}{-1000}\right)\right)$$

Las funciones para la variable lingüística COFE son las siguientes:

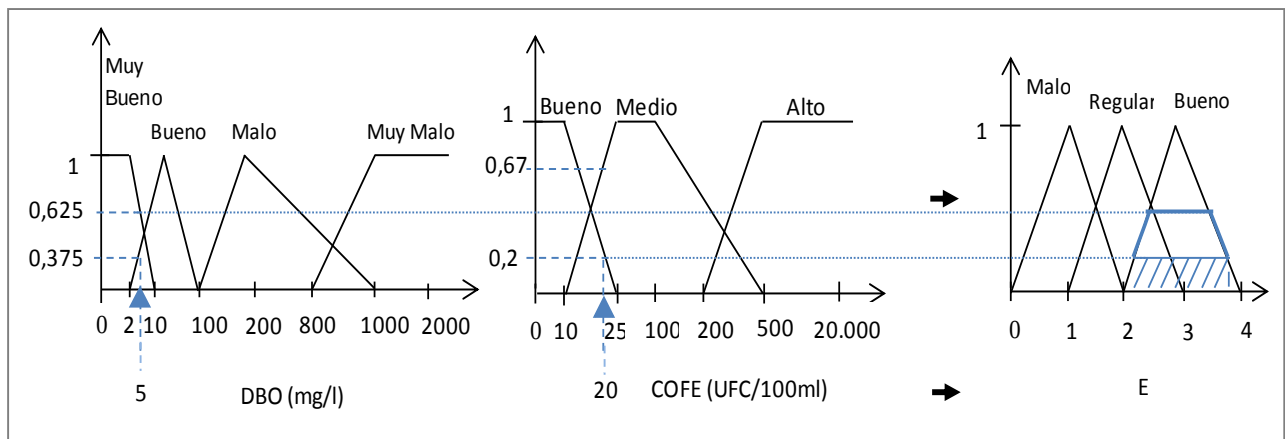
$$COFE_1(x) = \max\left(\min\left(1, \frac{25-x}{25}\right), 0\right)$$

$$COFE_2(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-10}{15}, 1, \frac{500-x}{-75}\right)\right)$$

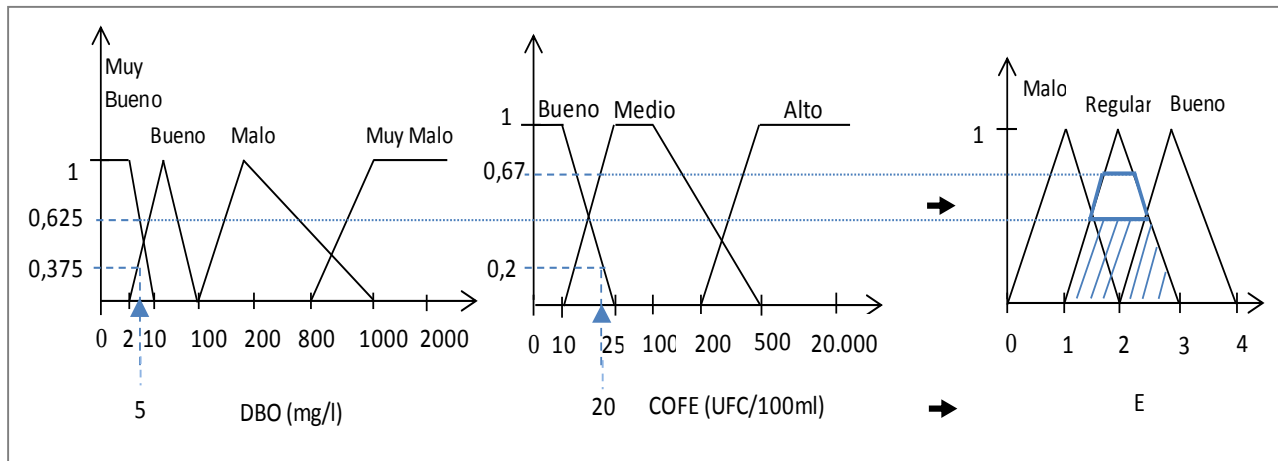
$$COFE_3(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-200}{300}, 1, \frac{20000-x}{-15000}\right)\right)$$

A continuación se opera el proceso de lógica difusa, suponiendo como ejemplo valores de DQO= 5 mg/l y COFE= 20 UFC/100ml, con el fin de encontrar el índice de estado. Esta condición genera 4 reglas dentro de la base de conocimiento y sus respectivas graficas como se presenta a continuación.

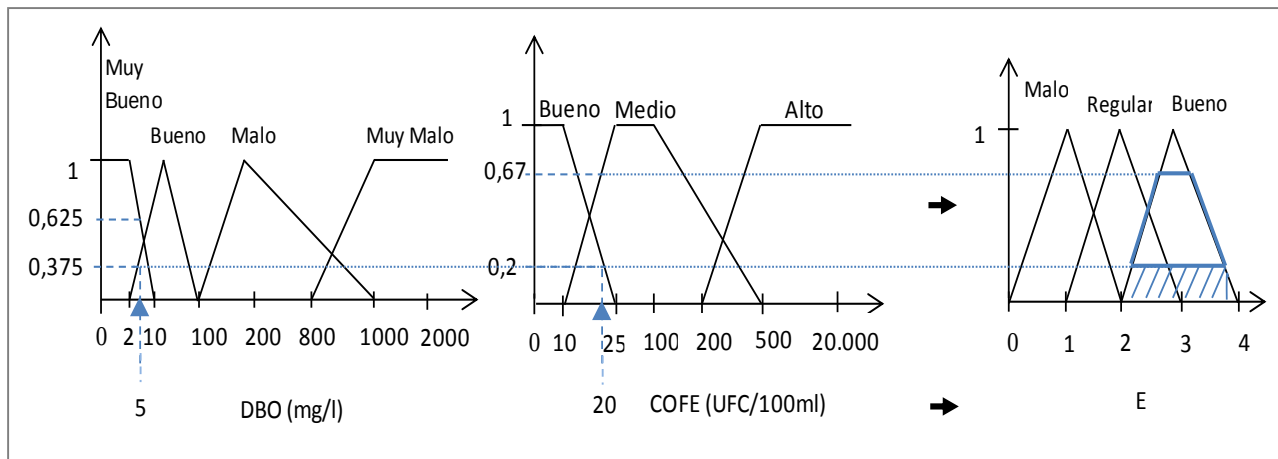
Regla 1. Si DQO= MB y COFE $\rightarrow$ E= B entonces se genera el siguiente gráfico:



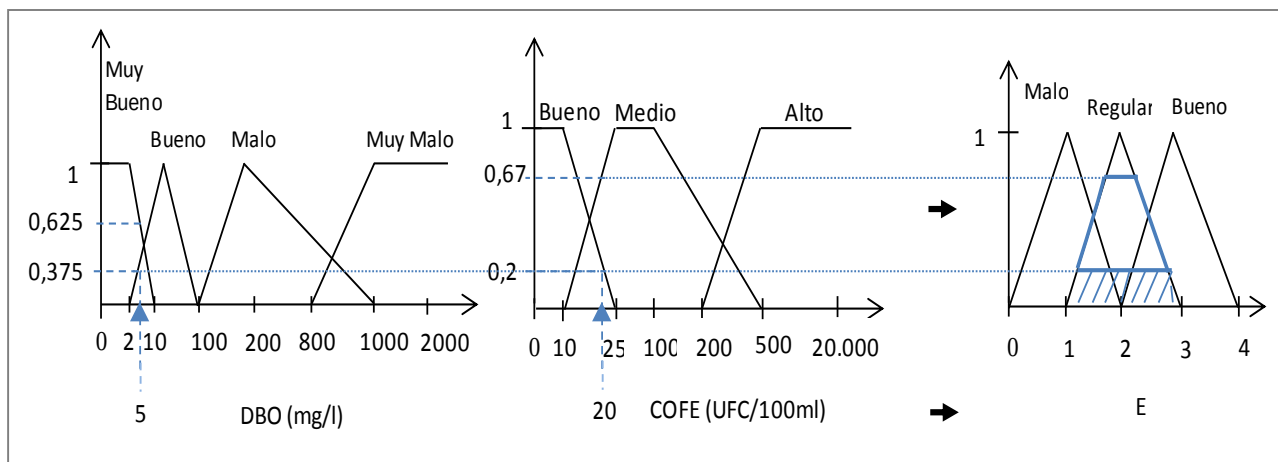
Regla 2. Si QDO= MB y COFE= M $\rightarrow$ E= R entonces se genera el siguiente gráfico:



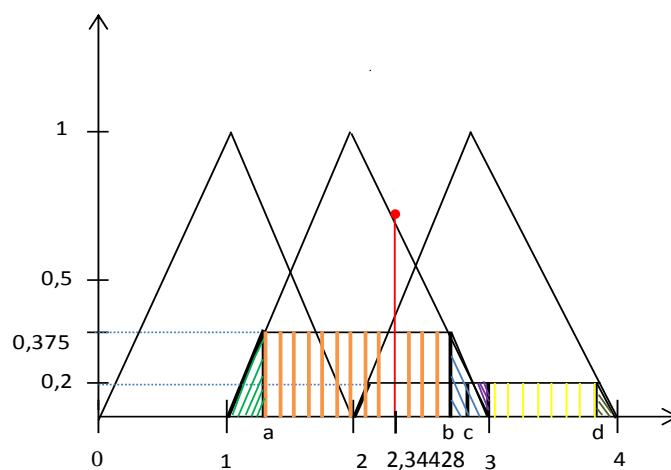
Regla 3. Si DQO=B y COFE= B $\rightarrow$ E= B entonces se genera el siguiente gráfico.



Regla 4. Si DQO=B y COFE= M $\rightarrow$ E= R entonces se genera el siguiente gráfico:



Al final se tiene la siguiente función para realizar el proceso de defusificación:



El proceso de defusificación se genera a partir del cálculo del centro de gravedad de la siguiente forma:

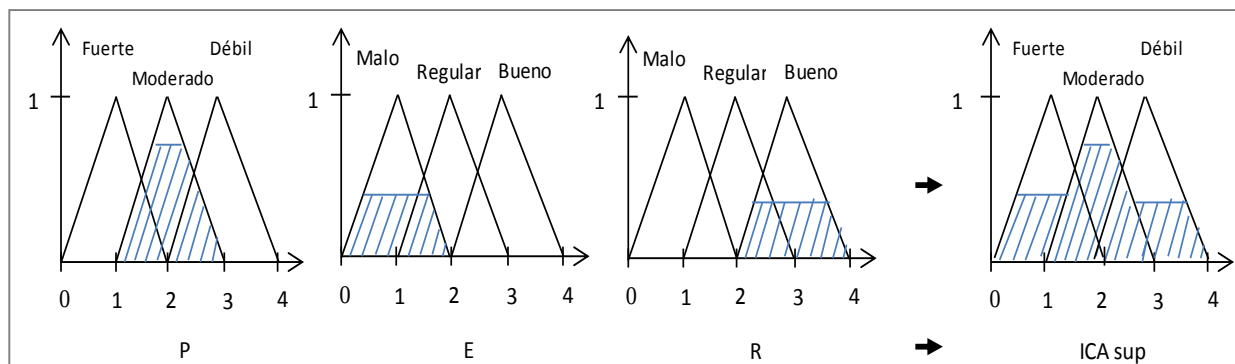
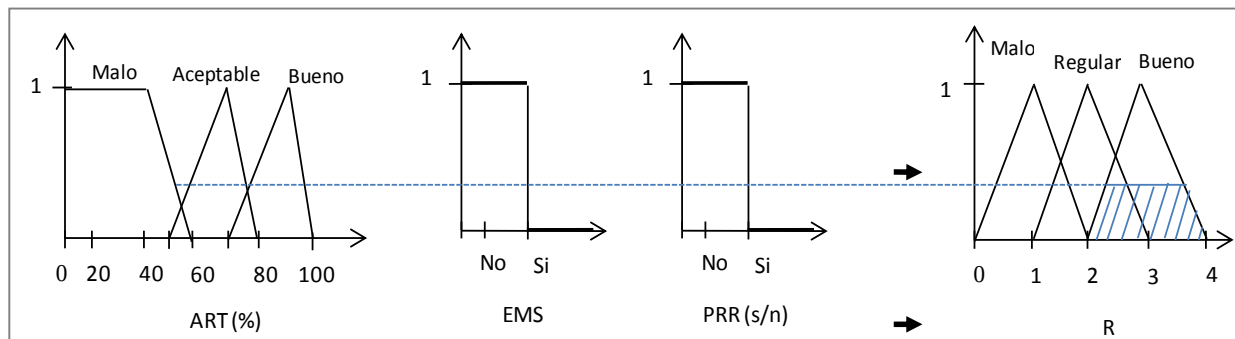
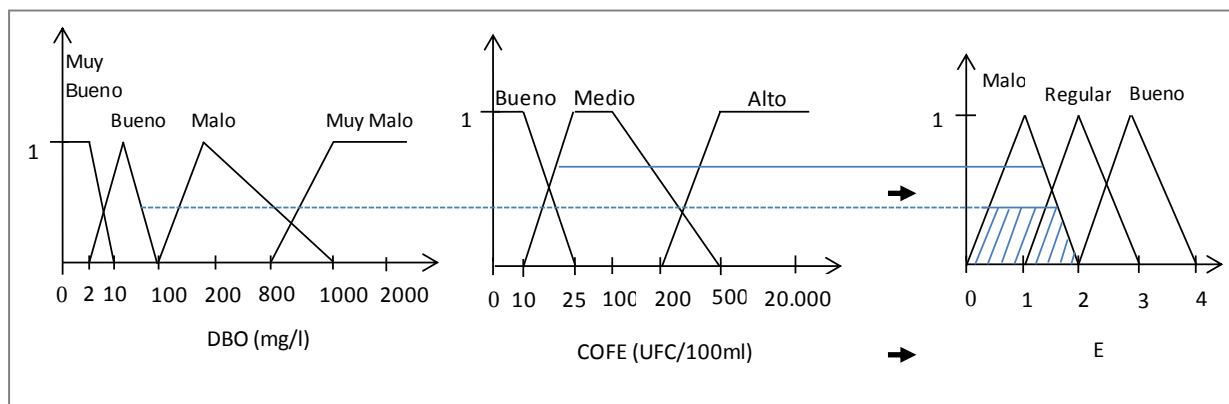
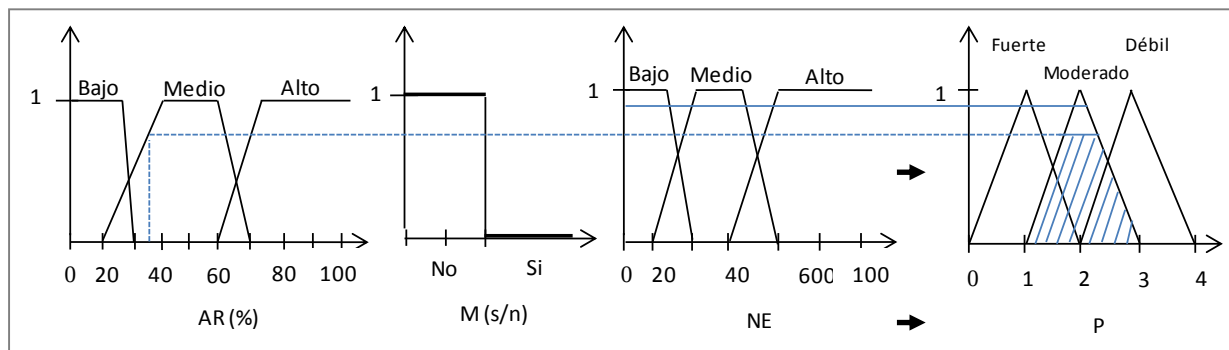
$$C_g = \frac{\int_1^4 x f(x) dx}{\int_1^4 f(x) dx}$$

$$= \frac{\int_1^a x f(x) dx + \int_a^b x f(x) dx + \int_b^3 x f(x) dx + \int_3^c x f(x) dx + \int_c^d x f(x) dx + \int_d^4 f(x) dx}{\int_1^a f(x) dx + \int_a^b f(x) dx + \int_b^3 f(x) dx + \int_3^c f(x) dx + \int_c^d f(x) dx + \int_d^4 f(x) dx}$$

Donde $a=1,375$; $b=2,625$; $c=2,8$; $d=3.8$

Dando como resultado: $C_g = 2,34428$, entonces el índice de estado genera un valor de Bueno :E=B

Similar al proceso anterior se realiza para hallar los valores de los índices de presión y respuesta, para generar el valor de cada índice definido, un esquema grafico que se presenta a continuación.



Anexo 4.7 Reglas de inferencia para el índice de degradación del suelo IDS.

Presión

No. Regla	GI	UFP	MRS	P	REGLA
1	B	B	I	M	IF (GI IS BAJO) AND (UFP IS BAJO) AND (MRS IS INADECUADO) THEN PRESION IS MODERADO
2	B	M	I	M	IF (GI IS BAJO) AND (UFP IS MODERADO) AND (MRS IS INADECUADO) THEN PRESION IS MODERADO
3	B	A	I	M	IF (GI IS BAJO) AND (UFP IS ALTO) AND (MRS IS INADECUADO) THEN PRESION IS MODERADO
4	M	B	A	M	IF (GI IS MEDIO) AND (UFP IS BAJO) AND (MRS IS ADECUADO) THEN PRESION IS MODERADO
5	M	M	A	M	IF (GI IS MEDIO) AND (UFP IS MODERADO) AND (MRS IS ADECUADO) THEN PRESION IS MODERADO
6	M	A	A	M	IF (GI IS MEDIO) AND (UFP IS ALTO) AND (MRS IS ADECUADO) THEN PRESION IS MODERADO
7	A	B	I	F	IF (GI IS ALTO) AND (UFP IS BAJO) AND (MRS IS INADECUADO) THEN PRESION IS FUERTE
8	A	M	I	F	IF (GI IS ALTO) AND (UFP IS MODERADO) AND (MRS IS INADECUADO) THEN PRESION IS FUERTE
9	A	A	I	F	IF (GI IS ALTO) AND (UFP IS ALTO) AND (MRS IS INADECUADO) THEN PRESION IS FUERTE
10	B	B	A	D	IF (GI IS BAJO) AND (UFP IS BAJO) AND (MRS IS ADECUADO) THEN PRESION IS DEBIL
11	B	M	A	D	IF (GI IS BAJO) AND (UFP IS MODERADO) AND (MRS IS ADECUADO) THEN PRESION IS DEBIL
12	B	A	A	F	IF (GI IS BAJO) AND (UFP IS ALTO) AND (MRS IS ADECUADO) THEN PRESION IS FUERTE
13	M	B	I	M	IF (GI IS MEDIO) AND (UFP IS BAJO) AND (MRS IS INADECUADO) THEN PRESION IS MODERADO
14	M	M	I	M	IF (GI IS MEDIO) AND (UFP IS MODERADO) AND (MRS IS INADECUADO) THEN PRESION IS MODERADO
15	M	A	I	F	IF (GI IS MEDIO) AND (UFP IS ALTO) AND (MRS IS INADECUADO) THEN PRESION IS FUERTE
16	A	B	A	F	IF (GI IS ALTO) AND (UFP IS BAJO) AND (MRS IS ADECUADO) THEN PRESION IS FUERTE
17	A	M	A	F	IF (GI IS ALTO) AND (UFP IS MODERADO) AND (MRS IS ADECUADO) THEN PRESION IS FUERTE
18	A	A	A	F	IF (GI IS ALTO) AND (UFP IS ALTO) AND (MRS IS ADECUADO) THEN PRESION IS FUERTE

Estado

No. Regla	NE	NCS	E	REGLA
1	B	B	B	IF (NE IS BAJO) AND (NCS IS BAJO) THEN ESTADO IS BUENO
2	B	M	B	IF (NE IS BAJO) AND (NCS IS MEDIO) THEN ESTADO IS BUENO
3	B	A	R	IF (NE IS BAJO) AND (NCS IS ALTO) THEN ESTADO IS REGULAR
4	M	B	R	IF (NE IS MEDIO) AND (NCS IS BAJO) THEN ESTADO IS REGULAR
5	M	M	R	IF (NE IS MEDIO) AND (NCS IS MEDIO) THEN ESTADO IS REGULAR
6	M	A	R	IF (NE IS MEDIO) AND (NCS IS ALTO) THEN ESTADO IS REGULAR
7	A	B	M	IF (NE IS ALTO) AND (NCS IS BAJO) THEN ESTADO IS MALO
8	A	M	M	IF (NE IS ALTO) AND (NCS IS MEDIO) THEN ESTADO IS MALO
9	A	A	M	IF (NE IS ALTO) AND (NCS IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO

Respuesta

No. Regla	PRR	PCS	PGIRs	R	REGLA
1	Si	Si	B	B	IF (PRR IS SI) AND (PCS IS SI) AND (PGIRs IS BAJO) THEN RESPUESTA IS BUENO
2	Si	No	B	M	IF (PRR IS SI) AND (PCS IS NO) AND (PGIRs IS BAJO) THEN RESPUESTA IS MALO
3	No	Si	B	M	IF (PRR IS NO) AND (PCS IS SI) AND (PGIRs IS BAJO) THEN RESPUESTA IS MALO
4	No	No	B	M	IF (PRR IS NO) AND (PCS IS NO) AND (PGIRs IS BAJO) THEN RESPUESTA IS MALO
5	Si	Si	M	R	IF (PRR IS SI) AND (PCS IS SI) AND (PGIRs IS MEDIO) THEN RESPUESTA IS REGULAR
6	Si	No	M	M	IF (PRR IS SI) AND (PCS IS NO) AND (PGIRs IS MEDIO) THEN RESPUESTA IS MALO
7	No	Si	M	M	IF (PRR IS NO) AND (PCS IS SI) AND (PGIRs IS MEDIO) THEN RESPUESTA IS MALO
8	No	No	M	M	IF (PRR IS NO) AND (PCS IS NO) AND (PGIRs IS MEDIO) THEN RESPUESTA IS MALO
9	Si	Si	A	B	IF (PRR IS SI) AND (PCS IS SI) AND (PGIRs IS ALTO) THEN RESPUESTA IS BUENO
10	Si	No	A	R	IF (PRR IS SI) AND (PCS IS NO) AND (PGIRs IS ALTO) THEN RESPUESTA IS REGULAR
11	No	Si	A	R	IF (PRR IS NO) AND (PCS IS SI) AND (PGIRs IS ALTO) THEN RESPUESTA IS REGULAR
12	No	No	A	M	IF (PRR IS NO) AND (PCS IS NO) AND (PGIRs IS ALTO) THEN RESPUESTA IS MALO

Índice IDS

No. Regla	Zona cuenca	P	E	R	IDS	REGLA
1	A,M,B	D	B	B	B	IF (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN IDS_ALTA IS BUENO

2	A,M,B	D	R	B	B	IF (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN IDS_ALTA IS BUENO
3	A,M,B	D	M	B	B	IF (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN IDS_ALTA IS BUENO
4	A,M,B	D	B	R	R	IF (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
5	A,M,B	D	R	R	R	IF (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
6	A,M,B	D	M	R	R	IF (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
7	A,M,B	D	B	M	R	IF (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
8	A,M,B	D	R	M	R	IF (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
9	A,M,B	D	M	M	M	IF (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN IDS_ALTA IS MALO
10	A,M,B	M	B	B	M	IF (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN IDS_ALTA IS MALO
11	A,M,B	M	R	B	B	IF (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN IDS_ALTA IS BUENO
12	A,M,B	M	M	B	B	IF (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN IDS_ALTA IS BUENO
13	A,M,B	M	B	R	R	IF (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
14	A,M,B	M	R	R	R	IF (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
15	A,M,B	M	M	R	R	IF (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
16	A,M,B	M	B	M	R	IF (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
17	A,M,B	M	R	M	R	IF (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
18	A,M,B	M	M	M	M	IF (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN IDS_ALTA IS MALO
19	A,M,B	F	B	B	R	IF (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
20	A,M,B	F	R	B	R	IF (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
21	A,M,B	F	M	B	M	IF (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN IDS_ALTA IS MALO
22	A,M,B	F	B	R	R	IF (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
23	A,M,B	F	R	R	R	IF (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN IDS_ALTA IS REGULAR
24	A,M,B	F	M	R	M	IF (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN IDS_ALTA IS MALO
25	A,M,B	F	B	M	M	IF (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN IDS_ALTA IS MALO
26	A,M,B	F	R	M	M	IF (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN IDS_ALTA IS MALO
27	A,M,B	F	M	M	M	IF (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN IDS_ALTA IS MALO

Anexo 4.8 Reglas de inferencia para el índice de cambio climático ICC.

Presión

No. Regla	ICO ₂	P	REGLAS
1	B	D	IF (ICO2 IS BAJO) THEN PRESION IS DEBIL
2	M	M	IF (ICO2 IS MEDIO) THEN PRESION IS MODERADO
3	A	F	IF (ICO2 IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE

Estado

No. Regla	VPA	VTA	IEN	E	REGLAS
1	B	B	B	B	IF (VPA IS BAJO) AND (VTA IS BAJO) AND (IEN IS BAJO) THEN ESTADO IS BUENO
2	B	M	B	B	IF (VPA IS BAJO) AND (VTA IS MEDIO) AND (IEN IS BAJO) THEN ESTADO IS BUENO
3	B	A	B	B	IF (VPA IS BAJO) AND (VTA IS ALTO) AND (IEN IS BAJO) THEN ESTADO IS BUENO
4	B	B	M	R	IF (VPA IS BAJO) AND (VTA IS BAJO) AND (IEN IS MEDIO) THEN ESTADO IS REGULAR
5	B	M	M	R	IF (VPA IS BAJO) AND (VTA IS MEDIO) AND (IEN IS MEDIO) THEN ESTADO IS REGULAR
6	B	A	M	R	IF (VPA IS BAJO) AND (VTA IS ALTO) AND (IEN IS MEDIO) THEN ESTADO IS REGULAR
7	B	B	A	R	IF (VPA IS BAJO) AND (VTA IS BAJO) AND (IEN IS ALTO) THEN ESTADO IS REGULAR
8	B	M	A	R	IF (VPA IS BAJO) AND (VTA IS MEDIO) AND (IEN IS ALTO) THEN ESTADO IS REGULAR
9	B	A	A	M	IF (VPA IS BAJO) AND (VTA IS ALTO) AND (IEN IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO
10	M	B	B	B	IF (VPA IS MEDIO) AND (VTA IS BAJO) AND (IEN IS BAJO) THEN ESTADO IS BUENO
11	M	M	B	B	IF (VPA IS MEDIO) AND (VTA IS MEDIO) AND (IEN IS BAJO) THEN ESTADO IS BUENO
12	M	A	B	B	IF (VPA IS MEDIO) AND (VTA IS ALTO) AND (IEN IS BAJO) THEN ESTADO IS BUENO
13	M	B	M	R	IF (VPA IS MEDIO) AND (VTA IS BAJO) AND (IEN IS MEDIO) THEN ESTADO IS REGULAR
14	M	M	M	R	IF (VPA IS MEDIO) AND (VTA IS MEDIO) AND (IEN IS MEDIO) THEN ESTADO IS REGULAR
15	M	A	M	R	IF (VPA IS MEDIO) AND (VTA IS ALTO) AND (IEN IS MEDIO) THEN ESTADO IS REGULAR
16	M	B	A	M	IF (VPA IS MEDIO) AND (VTA IS BAJO) AND (IEN IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO
17	M	M	A	M	IF (VPA IS MEDIO) AND (VTA IS MEDIO) AND (IEN IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO
18	M	A	A	M	IF (VPA IS MEDIO) AND (VTA IS ALTO) AND (IEN IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO
19	A	B	B	B	IF (VPA IS ALTO) AND (VTA IS BAJO) AND (IEN IS BAJO) THEN ESTADO IS BUENO
20	A	M	B	M	IF (VPA IS ALTO) AND (VTA IS MEDIO) AND (IEN IS BAJO) THEN ESTADO IS MALO
21	A	A	B	M	IF (VPA IS ALTO) AND (VTA IS ALTO) AND (IEN IS BAJO) THEN ESTADO IS MALO
22	A	B	M	M	IF (VPA IS ALTO) AND (VTA IS BAJO) AND (IEN IS MEDIO) THEN ESTADO IS MALO
23	A	M	M	M	IF (VPA IS ALTO) AND (VTA IS MEDIO) AND (IEN IS MEDIO) THEN ESTADO IS MALO
24	A	A	M	M	IF (VPA IS ALTO) AND (VTA IS ALTO) AND (IEN IS MEDIO) THEN ESTADO IS MALO
25	A	B	A	M	IF (VPA IS ALTO) AND (VTA IS BAJO) AND (IEN IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO
26	A	M	A	M	IF (VPA IS ALTO) AND (VTA IS MEDIO) AND (IEN IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO
27	A	A	A	M	IF (VPA IS ALTO) AND (VTA IS ALTO) AND (IEN IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO

Respuesta

No. Regla	MACC	IMA	R	REGLAS
1	Si	Si	B	IF (MACC IS SI) AND (IMA IS SI) THEN RESPUESTA IS BUENO
2	No	Si	R	IF (MACC IS NO) AND (IMA IS SI) THEN RESPUESTA IS REGULAR
3	Si	No	R	IF (MACC IS SI) AND (IMA IS NO) THEN RESPUESTA IS REGULAR
4	No	No	M	IF (MACC IS NO) AND (IMA IS NO) THEN RESPUESTA IS MALO

Índice ICC

No. Regla	Zona cuenca	P	E	R	ICC	REGLAS
1	A,M,B	D	B	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN ICC_ALTA IS BUENO
2	A,M,B	D	R	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN ICC_ALTA IS BUENO
3	A,M,B	D	M	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN ICC_ALTA IS BUENO
4	A,M,B	D	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
5	A,M,B	D	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
6	A,M,B	D	M	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
7	A,M,B	D	B	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
8	A,M,B	D	R	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN ICC_ALTA IS REGULAR

9	A,M,B	D	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS DEBIL) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN ICC_ALTA IS MALO
10	A,M,B	M	B	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN ICC_ALTA IS BUENO
11	A,M,B	M	R	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN ICC_ALTA IS BUENO
12	A,M,B	M	M	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN ICC_ALTA IS BUENO
13	A,M,B	M	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
14	A,M,B	M	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
15	A,M,B	M	M	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
16	A,M,B	M	B	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
17	A,M,B	M	R	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
18	A,M,B	M	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS MODERADO) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN ICC_ALTA IS MALO
19	A,M,B	F	B	B	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
20	A,M,B	F	R	B	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
21	A,M,B	F	M	B	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS BUENO) THEN ICC_ALTA IS MALO
22	A,M,B	F	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
23	A,M,B	F	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN ICC_ALTA IS REGULAR
24	A,M,B	F	M	R	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS REGULAR) THEN ICC_ALTA IS MALO
25	A,M,B	F	B	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS BUENO) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN ICC_ALTA IS MALO
26	A,M,B	F	R	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS REGULAR) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN ICC_ALTA IS MALO
27	A,M,B	F	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (PRESION IS FUERTE) AND (ESTADO IS MALO) AND (RESPUESTA IS MALO) THEN ICC_ALTA IS MALO

Anexo 4. 9 Reglas de inferencia para el índice de gobernanza del agua IGBA.

Presión

No. Regla	CUA	CUS	TCP	P	REGLAS
1	B	B	B	D	IF (CUA IS BAJO) AND (CUS IS BAJO) AND (TCP IS BAJO) THEN PRESION IS DEBIL
2	B	M	B	M	IF (CUA IS BAJO) AND (CUS IS MEDIO) AND (TCP IS BAJO) THEN PRESION IS MODERADO
3	B	A	B	F	IF (CUA IS BAJO) AND (CUS IS ALTO) AND (TCP IS BAJO) THEN PRESION IS FUERTE
4	B	B	M	D	IF (CUA IS BAJO) AND (CUS IS BAJO) AND (TCP IS MEDIO) THEN PRESION IS DEBIL
5	B	M	M	M	IF (CUA IS BAJO) AND (CUS IS MEDIO) AND (TCP IS MEDIO) THEN PRESION IS MODERADO
6	B	A	M	F	IF (CUA IS BAJO) AND (CUS IS ALTO) AND (TCP IS MEDIO) THEN PRESION IS FUERTE
7	B	B	A	M	IF (CUA IS BAJO) AND (CUS IS BAJO) AND (TCP IS ALTO) THEN PRESION IS MODERADO
8	B	M	A	M	IF (CUA IS BAJO) AND (CUS IS MEDIO) AND (TCP IS ALTO) THEN PRESION IS MODERADO
9	B	A	A	F	IF (CUA IS BAJO) AND (CUS IS ALTO) AND (TCP IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE

10	M	B	B	M	IF (CUA IS MEDIO) AND (CUS IS BAJO) AND (TCP IS BAJO) THEN PRESION IS MODERADO
11	M	M	B	M	IF (CUA IS MEDIO) AND (CUS IS MEDIO) AND (TCP IS BAJO) THEN PRESION IS MODERADO
12	M	A	B	F	IF (CUA IS MEDIO) AND (CUS IS ALTO) AND (TCP IS BAJO) THEN PRESION IS FUERTE
13	M	B	M	M	IF (CUA IS MEDIO) AND (CUS IS BAJO) AND (TCP IS MEDIO) THEN PRESION IS MODERADO
14	M	M	M	M	IF (CUA IS MEDIO) AND (CUS IS MEDIO) AND (TCP IS MEDIO) THEN PRESION IS MODERADO
15	M	A	M	F	IF (CUA IS MEDIO) AND (CUS IS ALTO) AND (TCP IS MEDIO) THEN PRESION IS FUERTE
16	M	B	A	F	IF (CUA IS MEDIO) AND (CUS IS BAJO) AND (TCP IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE
17	M	M	A	F	IF (CUA IS MEDIO) AND (CUS IS MEDIO) AND (TCP IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE
18	M	A	A	F	IF (CUA IS MEDIO) AND (CUS IS ALTO) AND (TCP IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE
19	A	B	B	F	IF (CUA IS ALTO) AND (CUS IS BAJO) AND (TCP IS BAJO) THEN PRESION IS FUERTE
20	A	M	B	F	IF (CUA IS ALTO) AND (CUS IS MEDIO) AND (TCP IS BAJO) THEN PRESION IS FUERTE
21	A	A	B	F	IF (CUA IS ALTO) AND (CUS IS ALTO) AND (TCP IS BAJO) THEN PRESION IS FUERTE
22	A	B	M	F	IF (CUA IS ALTO) AND (CUS IS BAJO) AND (TCP IS MEDIO) THEN PRESION IS FUERTE
23	A	M	M	F	IF (CUA IS ALTO) AND (CUS IS MEDIO) AND (TCP IS MEDIO) THEN PRESION IS FUERTE
24	A	A	M	F	IF (CUA IS ALTO) AND (CUS IS ALTO) AND (TCP IS MEDIO) THEN PRESION IS FUERTE
25	A	B	A	F	IF (CUA IS ALTO) AND (CUS IS BAJO) AND (TCP IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE
26	A	M	A	F	IF (CUA IS ALTO) AND (CUS IS MEDIO) AND (TCP IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE
27	A	A	A	F	IF (CUA IS ALTO) AND (CUS IS ALTO) AND (TCP IS ALTO) THEN PRESION IS FUERTE

Estado

No. Regla	GPC	CI	E	REGLAS
1	B	B	M	IF (GPC IS BAJO) AND (CI IS BAJO) THEN E_IGBA IS MALO
2	B	M	M	IF (GPC IS BAJO) AND (CI IS MEDIO) THEN E_IGBA IS MALO
3	B	A	M	IF (GPC IS BAJO) AND (CI IS ALTO) THEN E_IGBA IS MALO
4	M	B	M	IF (GPC IS MEDIO) AND (CI IS BAJO) THEN E_IGBA IS MALO
5	M	M	R	IF (GPC IS MEDIO) AND (CI IS MEDIO) THEN E_IGBA IS REGULAR
6	M	A	B	IF (GPC IS MEDIO) AND (CI IS ALTO) THEN E_IGBA IS BUENO
7	A	B	M	IF (GPC IS ALTO) AND (CI IS BAJO) THEN E_IGBA IS MALO
8	A	M	R	IF (GPC IS ALTO) AND (CI IS MEDIO) THEN E_IGBA IS REGULAR
9	A	A	B	IF (GPC IS ALTO) AND (CI IS ALTO) THEN E_IGBA IS BUENO

Respuesta

No. Regla	CPS	CCH	R	REGLAS
1	B	Si	R	IF (CPS IS BAJO) AND (CCH IS SI) THEN R_IGBA IS REGULAR
2	M	No	M	IF (CPS IS MODERADO) AND (CCH IS NO) THEN R_IGBA IS MALO
3	A	Si	B	IF (CPS IS ALTO) AND (CCH IS SI) THEN R_IGBA IS BUENO
4	B	No	M	IF (CPS IS BAJO) AND (CCH IS NO) THEN R_IGBA IS MALO
5	M	Si	B	IF (CPS IS MODERADO) AND (CCH IS SI) THEN R_IGBA IS BUENO
6	A	No	M	IF (CPS IS ALTO) AND (CCH IS NO) THEN R_IGBA IS MALO

Índice IGBA

No. Regla	Zona cuenca	P	E	R	IGBA	REGLAS
1	A,M,B	D	B	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS DEBIL) AND (E_IGBA IS BUENO) AND (R_IGBA IS BUENO) THEN IGBA_ALTA IS BUENO
2	A,M,B	D	R	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS DEBIL) AND (E_IGBA IS REGULAR) AND (R_IGBA IS BUENO) THEN IGBA_ALTA IS BUENO

3	A,M,B	D	M	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS DEBIL) AND (E_IGBA IS MALO) AND (R_IGBA IS BUENO) THEN IGBA_ALTA IS BUENO
4	A,M,B	D	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS DEBIL) AND (E_IGBA IS BUENO) AND (R_IGBA IS REGULAR) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
5	A,M,B	D	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS DEBIL) AND (E_IGBA IS REGULAR) AND (R_IGBA IS REGULAR) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
6	A,M,B	D	M	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS DEBIL) AND (E_IGBA IS MALO) AND (R_IGBA IS REGULAR) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
7	A,M,B	D	B	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS DEBIL) AND (E_IGBA IS BUENO) AND (R_IGBA IS MALO) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
8	A,M,B	D	R	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS DEBIL) AND (E_IGBA IS REGULAR) AND (R_IGBA IS MALO) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
9	A,M,B	D	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS DEBIL) AND (E_IGBA IS MALO) AND (R_IGBA IS MALO) THEN IGBA_ALTA IS MALO
10	A,M,B	M	B	B	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS MODERADO) AND (E_IGBA IS BUENO) AND (R_IGBA IS BUENO) THEN IGBA_ALTA IS MALO
11	A,M,B	M	R	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS MODERADO) AND (E_IGBA IS REGULAR) AND (R_IGBA IS BUENO) THEN IGBA_ALTA IS BUENO
12	A,M,B	M	M	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS MODERADO) AND (E_IGBA IS MALO) AND (R_IGBA IS BUENO) THEN IGBA_ALTA IS BUENO
13	A,M,B	M	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS MODERADO) AND (E_IGBA IS BUENO) AND (R_IGBA IS REGULAR) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
14	A,M,B	M	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS MODERADO) AND (E_IGBA IS REGULAR) AND (R_IGBA IS REGULAR) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
15	A,M,B	M	M	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS MODERADO) AND (E_IGBA IS MALO) AND (R_IGBA IS REGULAR) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
16	A,M,B	M	B	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS MODERADO) AND (E_IGBA IS BUENO) AND (R_IGBA IS MALO) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
17	A,M,B	M	R	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS MODERADO) AND (E_IGBA IS REGULAR) AND (R_IGBA IS MALO) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
18	A,M,B	M	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS MODERADO) AND (E_IGBA IS MALO) AND (R_IGBA IS MALO) THEN IGBA_ALTA IS MALO
19	A,M,B	F	B	B	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS FUERTE) AND (E_IGBA IS BUENO) AND (R_IGBA IS BUENO) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
20	A,M,B	F	R	B	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS FUERTE) AND (E_IGBA IS REGULAR) AND (R_IGBA IS BUENO) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
21	A,M,B	F	M	B	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS FUERTE) AND (E_IGBA IS MALO) AND (R_IGBA IS BUENO) THEN IGBA_ALTA IS MALO
22	A,M,B	F	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS FUERTE) AND (E_IGBA IS BUENO) AND (R_IGBA IS REGULAR) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
23	A,M,B	F	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS FUERTE) AND (E_IGBA IS REGULAR) AND (R_IGBA IS REGULAR) THEN IGBA_ALTA IS REGULAR
24	A,M,B	F	M	R	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS FUERTE) AND (E_IGBA IS MALO) AND (R_IGBA IS REGULAR) THEN IGBA_ALTA IS MALO

25	A,M,B	F	B	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS FUERTE) AND (E_IGBA IS BUENO) AND (R_IGBA IS MALO) THEN IGBA_ALTA IS MALO
26	A,M,B	F	R	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS FUERTE) AND (E_IGBA IS REGULAR) AND (R_IGBA IS MALO) THEN IGBA_ALTA IS MALO
27	A,M,B	F	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IGBA IS FUERTE) AND (E_IGBA IS MALO) AND (R_IGBA IS MALO) THEN IGBA_ALTA IS MALO

Anexo 4.10 Reglas de inferencia para el índice educación y cultura del agua IEDCA.

Presión

No. Regla	AEA	PIA	P	REGLAS
1	B	B	M	IF (AEA IS BAJO) AND (PIA IS BAJO) THEN P_IEDCA IS MODERADO
2	B	M	F	IF (AEA IS BAJO) AND (PIA IS MEDIO) THEN P_IEDCA IS FUERTE
3	B	A	F	IF (AEA IS BAJO) AND (PIA IS ALTO) THEN P_IEDCA IS FUERTE
4	M	B	M	IF (AEA IS MEDIO) AND (PIA IS BAJO) THEN P_IEDCA IS MODERADO
5	M	M	M	IF (AEA IS MEDIO) AND (PIA IS MEDIO) THEN P_IEDCA IS MODERADO
6	M	A	F	IF (AEA IS MEDIO) AND (PIA IS ALTO) THEN P_IEDCA IS FUERTE
7	A	B	D	IF (AEA IS ALTO) AND (PIA IS BAJO) THEN P_IEDCA IS DEBIL
8	A	M	D	IF (AEA IS ALTO) AND (PIA IS MEDIO) THEN P_IEDCA IS DEBIL
9	A	A	M	IF (AEA IS ALTO) AND (PIA IS ALTO) THEN P_IEDCA IS MODERADO

Estado

No. Regla	PEA	CUEA	E	REGLAS
1	B	B	M	IF (PEA IS BAJO) AND (CUEA IS BAJO) THEN E_IEDCA IS MALO
2	B	M	M	IF (PEA IS BAJO) AND (CUEA IS MEDIO) THEN E_IEDCA IS MALO
3	B	A	M	IF (PEA IS BAJO) AND (CUEA IS ALTO) THEN E_IEDCA IS MALO
4	M	B	R	IF (PEA IS MEDIO) AND (CUEA IS BAJO) THEN E_IEDCA IS REGULAR
5	M	M	R	IF (PEA IS MEDIO) AND (CUEA IS MEDIO) THEN E_IEDCA IS REGULAR
6	M	A	R	IF (PEA IS MEDIO) AND (CUEA IS ALTO) THEN E_IEDCA IS REGULAR
7	A	B	R	IF (PEA IS ALTO) AND (CUEA IS BAJO) THEN E_IEDCA IS REGULAR
8	A	M	B	IF (PEA IS ALTO) AND (CUEA IS MEDIO) THEN E_IEDCA IS BUENO
9	A	A	B	IF (PEA IS ALTO) AND (CUEA IS ALTO) THEN E_IEDCA IS BUENO

Respuesta

No. Regla	PCEA	REA	R	REGLAS
1	Si	B	R	IF (PCEA IS SI) AND (REA IS BAJO) THEN R_IEDCA IS REGULAR
2	Si	M	B	IF (PCEA IS SI) AND (REA IS MEDIO) THEN R_IEDCA IS BUENO
3	No	A	B	IF (PCEA IS NO) AND (REA IS ALTO) THEN R_IEDCA IS BUENO
4	No	B	M	IF (PCEA IS NO) AND (REA IS BAJO) THEN R_IEDCA IS MALO
5	Si	M	R	IF (PCEA IS SI) AND (REA IS MEDIO) THEN R_IEDCA IS REGULAR
6	Si	A	M	IF (PCEA IS SI) AND (REA IS ALTO) THEN R_IEDCA IS MALO

Índice IEDCA

No. Regla	Zona cuenca	P	E	R	IEDCA	REGLAS
1	A,M,B	D	B	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS DEBIL) AND (E_IEDCA IS BUENO) AND (R_IEDCA IS BUENO) THEN IEDCA_ALTA IS BUENO
2	A,M,B	D	R	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS DEBIL) AND (E_IEDCA IS REGULAR) AND (R_IEDCA IS BUENO) THEN IEDCA_ALTA IS BUENO
3	A,M,B	D	M	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS DEBIL) AND (E_IEDCA IS MALO) AND (R_IEDCA IS BUENO) THEN IEDCA_ALTA IS BUENO

4	A,M,B	D	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS DEBIL) AND (E_IEDCA IS BUENO) AND (R_IEDCA IS REGULAR) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
5	A,M,B	D	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS DEBIL) AND (E_IEDCA IS REGULAR) AND (R_IEDCA IS REGULAR) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
6	A,M,B	D	M	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS DEBIL) AND (E_IEDCA IS MALO) AND (R_IEDCA IS REGULAR) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
7	A,M,B	D	B	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS DEBIL) AND (E_IEDCA IS BUENO) AND (R_IEDCA IS MALO) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
8	A,M,B	D	R	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS DEBIL) AND (E_IEDCA IS REGULAR) AND (R_IEDCA IS MALO) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
9	A,M,B	D	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS DEBIL) AND (E_IEDCA IS MALO) AND (R_IEDCA IS MALO) THEN IEDCA_ALTA IS MALO
10	A,M,B	M	B	B	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS MODERADO) AND (E_IEDCA IS BUENO) AND (R_IEDCA IS BUENO) THEN IEDCA_ALTA IS MALO
11	A,M,B	M	R	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS MODERADO) AND (E_IEDCA IS REGULAR) AND (R_IEDCA IS BUENO) THEN IEDCA_ALTA IS BUENO
12	A,M,B	M	M	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS MODERADO) AND (E_IEDCA IS MALO) AND (R_IEDCA IS BUENO) THEN IEDCA_ALTA IS BUENO
13	A,M,B	M	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS MODERADO) AND (E_IEDCA IS BUENO) AND (R_IEDCA IS REGULAR) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
14	A,M,B	M	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS MODERADO) AND (E_IEDCA IS REGULAR) AND (R_IEDCA IS REGULAR) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
15	A,M,B	M	M	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS MODERADO) AND (E_IEDCA IS MALO) AND (R_IEDCA IS REGULAR) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
16	A,M,B	M	B	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS MODERADO) AND (E_IEDCA IS BUENO) AND (R_IEDCA IS MALO) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
17	A,M,B	M	R	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS MODERADO) AND (E_IEDCA IS REGULAR) AND (R_IEDCA IS MALO) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
18	A,M,B	M	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS MODERADO) AND (E_IEDCA IS MALO) AND (R_IEDCA IS MALO) THEN IEDCA_ALTA IS MALO
19	A,M,B	F	B	B	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS FUERTE) AND (E_IEDCA IS BUENO) AND (R_IEDCA IS BUENO) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
20	A,M,B	F	R	B	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS FUERTE) AND (E_IEDCA IS REGULAR) AND (R_IEDCA IS BUENO) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
21	A,M,B	F	M	B	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS FUERTE) AND (E_IEDCA IS MALO) AND (R_IEDCA IS BUENO) THEN IEDCA_ALTA IS MALO
22	A,M,B	F	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS FUERTE) AND (E_IEDCA IS BUENO) AND (R_IEDCA IS REGULAR) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
23	A,M,B	F	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS FUERTE) AND (E_IEDCA IS REGULAR) AND (R_IEDCA IS REGULAR) THEN IEDCA_ALTA IS REGULAR
24	A,M,B	F	M	R	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS FUERTE) AND (E_IEDCA IS MALO) AND (R_IEDCA IS REGULAR) THEN IEDCA_ALTA IS MALO

25	A,M,B	F	B	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS FUERTE) AND (E_IEDCA IS BUENO) AND (R_IEDCA IS MALO) THEN IEDCA_ALTA IS MALO
26	A,M,B	F	R	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS FUERTE) AND (E_IEDCA IS REGULAR) AND (R_IEDCA IS MALO) THEN IEDCA_ALTA IS MALO
27	A,M,B	F	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IEDCA IS FUERTE) AND (E_IEDCA IS MALO) AND (R_IEDCA IS MALO) THEN IEDCA_ALTA IS MALO

Anexo 4.11 Reglas de inferencia para el índice de datos, información y conocimiento **IDIC**.

Presión

No. Regla	RDA	TIC	P	REGLAS
1	B	Si	D	IF (RDA IS BAJO) AND (TIC IS SI) THEN P_IDIC IS DEBIL
2	B	No	M	IF (RDA IS BAJO) AND (TIC IS NO) THEN P_IDIC IS MODERADO
3	M	Si	D	IF (RDA IS MEDIO) AND (TIC IS SI) THEN P_IDIC IS DEBIL
4	M	No	F	IF (RDA IS MEDIO) AND (TIC IS NO) THEN P_IDIC IS FUERTE
5	A	Si	M	IF (RDA IS ALTO) AND (TIC IS SI) THEN P_IDIC IS MODERADO
6	A	No	F	IF (RDA IS ALTO) AND (TIC IS NO) THEN P_IDIC IS FUERTE

Estado

No. Regla	DDI	CSCH	E	REGLAS
1	B	B	M	IF (DDI IS BAJO) AND (CSCH IS BAJO) THEN E_IDIC IS MALO
2	B	M	M	IF (DDI IS BAJO) AND (CSCH IS MEDIO) THEN E_IDIC IS MALO
3	B	A	R	IF (DDI IS BAJO) AND (CSCH IS ALTO) THEN E_IDIC IS REGULAR
4	M	B	M	IF (DDI IS MEDIO) AND (CSCH IS BAJO) THEN E_IDIC IS MALO
5	M	M	R	IF (DDI IS MEDIO) AND (CSCH IS MEDIO) THEN E_IDIC IS REGULAR
6	M	A	B	IF (DDI IS MEDIO) AND (CSCH IS ALTO) THEN E_IDIC IS BUENO
7	A	B	R	IF (DDI IS ALTO) AND (CSCH IS BAJO) THEN E_IDIC IS REGULAR
8	A	M	B	IF (DDI IS ALTO) AND (CSCH IS MEDIO) THEN E_IDIC IS BUENO
9	A	A	B	IF (DDI IS ALTO) AND (CSCH IS ALTO) THEN E_IDIC IS BUENO

Respuesta

No. Regla	RPM	ITC	R	REGLAS
1	B	B	M	IF (RPM IS BAJO) AND (ITC IS BAJO) THEN R_IDIC IS MALO
2	B	M	M	IF (RPM IS BAJO) AND (ITC IS MEDIO) THEN R_IDIC IS MALO
3	B	A	R	IF (RPM IS BAJO) AND (ITC IS ALTO) THEN R_IDIC IS REGULAR
4	M	B	M	IF (RPM IS MEDIO) AND (ITC IS BAJO) THEN R_IDIC IS MALO
5	M	M	R	IF (RPM IS MEDIO) AND (ITC IS MEDIO) THEN R_IDIC IS REGULAR
6	M	A	B	IF (RPM IS MEDIO) AND (ITC IS ALTO) THEN R_IDIC IS BUENO
7	A	B	R	IF (RPM IS ALTO) AND (ITC IS BAJO) THEN R_IDIC IS REGULAR
8	A	M	B	IF (RPM IS ALTO) AND (ITC IS MEDIO) THEN R_IDIC IS BUENO
9	A	A	B	IF (RPM IS ALTO) AND (ITC IS ALTO) THEN R_IDIC IS BUENO

Índice IDIC

No. Regla	Zona cuenca	P	E	R	IDIC	REGLAS
1	A,M,B	D	B	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS DEBIL) AND (E_IDIC IS BUENO) AND (R_IDIC IS BUENO) THEN IDIC_ALTA IS BUENO

2	A,M,B	D	R	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS DEBIL) AND (E_IDIC IS REGULAR) AND (R_IDIC IS BUENO) THEN IDIC_ALTA IS BUENO
3	A,M,B	D	M	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS DEBIL) AND (E_IDIC IS MALO) AND (R_IDIC IS BUENO) THEN IDIC_ALTA IS BUENO
4	A,M,B	D	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS DEBIL) AND (E_IDIC IS BUENO) AND (R_IDIC IS REGULAR) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
5	A,M,B	D	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS DEBIL) AND (E_IDIC IS REGULAR) AND (R_IDIC IS REGULAR) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
6	A,M,B	D	M	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS DEBIL) AND (E_IDIC IS MALO) AND (R_IDIC IS REGULAR) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
7	A,M,B	D	B	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS DEBIL) AND (E_IDIC IS BUENO) AND (R_IDIC IS MALO) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
8	A,M,B	D	R	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS DEBIL) AND (E_IDIC IS REGULAR) AND (R_IDIC IS MALO) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
9	A,M,B	D	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS DEBIL) AND (E_IDIC IS MALO) AND (R_IDIC IS MALO) THEN IDIC_ALTA IS MALO
10	A,M,B	M	B	B	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS MODERADO) AND (E_IDIC IS BUENO) AND (R_IDIC IS BUENO) THEN IDIC_ALTA IS MALO
11	A,M,B	M	R	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS MODERADO) AND (E_IDIC IS REGULAR) AND (R_IDIC IS BUENO) THEN IDIC_ALTA IS BUENO
12	A,M,B	M	M	B	B	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS MODERADO) AND (E_IDIC IS MALO) AND (R_IDIC IS BUENO) THEN IDIC_ALTA IS BUENO
13	A,M,B	M	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS MODERADO) AND (E_IDIC IS BUENO) AND (R_IDIC IS REGULAR) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
14	A,M,B	M	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS MODERADO) AND (E_IDIC IS REGULAR) AND (R_IDIC IS REGULAR) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
15	A,M,B	M	M	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS MODERADO) AND (E_IDIC IS MALO) AND (R_IDIC IS REGULAR) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
16	A,M,B	M	B	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS MODERADO) AND (E_IDIC IS BUENO) AND (R_IDIC IS MALO) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
17	A,M,B	M	R	M	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS MODERADO) AND (E_IDIC IS REGULAR) AND (R_IDIC IS MALO) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
18	A,M,B	M	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS MODERADO) AND (E_IDIC IS MALO) AND (R_IDIC IS MALO) THEN IDIC_ALTA IS MALO
19	A,M,B	F	B	B	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS FUERTE) AND (E_IDIC IS BUENO) AND (R_IDIC IS BUENO) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
20	A,M,B	F	R	B	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS FUERTE) AND (E_IDIC IS REGULAR) AND (R_IDIC IS BUENO) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
21	A,M,B	F	M	B	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS FUERTE) AND (E_IDIC IS MALO) AND (R_IDIC IS BUENO) THEN IDIC_ALTA IS MALO
22	A,M,B	F	B	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS FUERTE) AND (E_IDIC IS BUENO) AND (R_IDIC IS REGULAR) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
23	A,M,B	F	R	R	R	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS FUERTE) AND (E_IDIC IS REGULAR) AND (R_IDIC IS REGULAR) THEN IDIC_ALTA IS REGULAR
24	A,M,B	F	M	R	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS FUERTE) AND (E_IDIC IS MALO) AND (R_IDIC IS REGULAR) THEN IDIC_ALTA IS MALO

25	A,M,B	F	B	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS FUERTE) AND (E_IDIC IS BUENO) AND (R_IDIC IS MALO) THEN IDIC_ALTA IS MALO
26	A,M,B	F	R	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS FUERTE) AND (E_IDIC IS REGULAR) AND (R_IDIC IS MALO) THEN IDIC_ALTA IS MALO
27	A,M,B	F	M	M	M	IF (ZONA_CUENCA IS ZONA_ALTA) AND (P_IDIC IS FUERTE) AND (E_IDIC IS MALO) AND (R_IDIC IS MALO) THEN IDIC_ALTA IS MALO

Anexo 6.1 Formato para el modelo *cuencaandina* en la microcuenca el Chocho

Fecha: DD/MM/AÑO 01 /07 / 2013

NOMBRE DE LA MICROCUENCAANDINA: ELCHOCHO

PERSONA QUIEN DILENGIA EL FORMATO: VIVIANA VARGAS FRANCO

INSTITUCIÓN (ES): UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE PALMIRA

Correo(s) electrónico (s): vvargasf@unal.edu.co

1. Preguntas del Subsistema Bio-Físico

Ítem	Descripción	Nombre del Indicador	Valores validos	Sitio de la microcuenca		
				Cuenc a alta	Cuenc a media	Cuenca Baja
1.1	Porcentaje estimado de vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales sin tratamiento a las fuentes superficiales (%)	AR	0% - 100%	90	80	80
1.2	Existencia actual o pasada de minería (Si/No)	M	Si / No	Si	Si	Si
1.3	Porcentaje estimado de erosión en la zona (%)	NE	0% - 100%	50	60	60
1.4	Valor promedio de Demanda Química de Oxígeno en las fuentes superficiales en cada zona (mg/l)	DQO	0 -2000 mg/l	400	800	800
1.5	Valor promedio de coliformes fecales en las fuentes superficiales en cada zona (UFC/100ml)	COFE	0 -20000 (UFC/100ml)	1000	20000	20000
1.6	Porcentaje estimado de aguas residuales domésticas e industriales tratadas (%)	ART	0% - 100%	0	0	0
1.7	Implementación de estrategias de minería sostenible por zona (Si/No)	EMS	Si / No	No	No	No
1.8	Implementación de planeas de reforestación y restauración por zona (Si/No)	PRR	Si / No	No	No	No
1.9	Porcentaje estimado de ganadería intensiva en la zona (%)	GI	0% - 100%	70	40	80
1.10	Porcentaje estimado de uso de fertilizantes y plaguicidas en la zona (%)	UFP	0% - 100%	50	70	70
1.11	Manejo de residuos sólidos en la zona(Inadecuado/Adecuado)	MRS	I/A	I	I	I
1.12	Porcentaje estimado de contaminación del suelo en la zona (%)	NCS	0% - 100%	30	50	70

1.13	Existencia de programas para prácticas de conservación del suelo (Si/No)	PCS	Si / No	No	No	No
1.14	Porcentaje estimado de implementación del Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos en la zona (%)	PGIRs	0% - 100%	0	0	0

2. Preguntas del Subsistema aire

Ítem	Descripción	Nombre del Indicador	Valores validos	Sitio de la microcuenca		
				Cuenc a alta	Cuenc a media	Cuenca Baja
2.1	Incremento porcentual de emisiones de bióxido de carbono	ICO₂	0% - 100%	60	40	60
2.2	Variación de la precipitación anual	VPA	0 – 1000 ml	40	40	40
2.3	Variación de la temperatura anual	VTA	0°C – 3.0°C	0,3	0,3	0,3
2.4	Nivel de ocurrencia de eventos naturales extremos (Sequías, inundaciones, deslizamientos, etc.)	IEN	Alto/Medio/Bajo	Medio	Medio	Medio
2.5	Aplicación de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático	MACC	Si / No	No	No	No
2.6	Inversión en el abatimiento y control de la contaminación del aire	IMA	Si / No	No	No	No

3. Preguntas del Subsistema Social

Ítem	Descripción	Nombre del Indicador	Valores validos	Sitio de la microcuenca		
				Cuenc a alta	Cuenc a media	Cuenca Baja
3.1	Nivel de conflictos por el uso del agua	CUA	Alto/Medio/Bajo	Alto	Alto	Alto
3.2	Nivel de conflictos por el uso del suelo	CUS	Alto/Medio/Bajo	Bajo	Alto	Alto
3.3	Tasa de crecimiento poblacional en el último año. (Población actual / población hace un año – 1)*100%	TCP	-2 a 4	0,03	1,9	0,1

3.4	Grado porcentual de participación comunitaria y de diversos actores	GPC	0% - 100%	20	30	30
3.5	Nivel de coordinación institucional	CI	Alto/Medio/Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
3.6	Nivel de ejecución de estrategias de comunicación y participación social	CPS	Alto/Moderado/Baja	Baja	Baja	Baja
3.7	Existencia de Consejo de cuenca funcionando con sistema administrativo propio	CCH	Si / No	No	No	No
3.8	Porcentaje estimado de actores interesados en educación y cultura del agua	AEA	0% - 100%	10	20	50
3.9	Nivel de prácticas inadecuadas del uso del agua	PIA	Alto/Medio/Bajo	Alto	Alto	Alto
3.10	Nivel de participación de la sociedad civil en proyectos de educación y cultura del agua	PEA	Alto/Medio/Bajo	Bajo	Medio	Medio
3.11	Nivel de capacitación en uso eficiente del agua	CUEA	Alto/Medio/Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
3.12	Implementación de programas de educación y cultura del agua	PCEA	Si / No	No	No	No
3.13	Porcentaje estimado de recursos para educación y cultura del agua	REA	0% - 100%	0	0	0

4. Preguntas del Subsistema tecnológico

Ítem	Descripción	Nombre del Indicador	Valores validos	Sitio de la microcuenca		
				Cuenc a alta	Cuenc a media	Cuenca Baja
4.1	Nivel de requerimientos de datos e información ambiental	RDA	Alto/Medio/Bajo	Alto	Alto	Alto
4.2	Existencia de procesos de transferencia de información y conocimiento	TIC	Si / No	No	No	No
4.3	Nivel de disponibilidad de datos, información y conocimiento de la CH	DDI	Alto/Medio/Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
4.4	Nivel de conocimiento sistematizado de la CH	CSCH	Alto/Medio/Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
4.5	Porcentaje estimado de recursos para planes de monitoreo	RPM	0% - 100%	0	0	0
4.6	Nivel de investigación y transferencia de conocimiento en la CH	ITC	Alto/Medio/Bajo	Bajo	Bajo	Bajo

