

Impactos ambientales de las pequeñas centrales hidroeléctricas a filo de agua en montañas andinas. Caso “El Edén”- Pensilvania - Caldas

Tulia Elena Hernández Burbano

Sebastián Hernández

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Programa de Ingeniería Ambiental

Manizales, Colombia

2017

Impactos ambientales de las pequeñas centrales hidroeléctricas a filo de agua en montañas  
andinas. Caso “El Edén”- Pensilvania - Caldas

Tulia Elena Hernández Burbano

Sebastián Hernández

Trabajo presentado como requisito para obtener el título de

Ingenieros Ambientales

Director:

Diego Alejandro Pérez Giraldo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Programa de Ingeniería Ambiental

Manizales, Colombia

2017

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma Jurado

**Dedicatoria.**

A Dios que permitió culminar nuestro propósito, a nuestras familias, cuyo apoyo incondicional fue pilar fundamental para llegar a esta meta.

Por siempre, Gracias

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, a su personal directivo, académico y administrativo, cuyo esfuerzo y dedicación en su diaria tarea, abrió para nosotros una puerta más permitiéndonos dar un paso hacia el infinito camino de la ciencia, el conocimiento, la técnica, el saber y la investigación.

Especial gratitud al asesor Diego Alejandro Pérez, por su permanente paciencia, disposición y voluntad de apoyo durante el proceso de construcción del presente informe.

Finalmente, las gracias para nuestras incondicionales familias, a nuestros amigos, a aquellos que compartieron en nuestros grupos de trabajo colaborativo, compañeros de clase, y a todos aquellos que aportaron en la construcción de esta investigación, decirles que han marcado nuestras vidas con el sello de la esperanza por un universo que jamás dejará de sonreír.

## Contenido

Resumen.....	15
Abstract.....	16
Introducción.....	17
1. Generalidades.....	20
1.1. Planteamiento del Problema: Contexto.....	20
1.1.1. Descripción del Problema.....	20
1.1.2. Pregunta Problema.....	23
2. Justificación.....	24
3. Objetivos.....	26
3.1 Objetivo General.....	26
3.2 Objetivos Específicos.....	26
4. Hipótesis.....	27
5. Marco Conceptual.....	29
5.1. Cambio Climático.....	29
5.2. Cambios en el uso de la tierra.....	30
5.3. Desertificación.....	31
5.4. Sensibilidad del clima.....	32
5.5. Sequía.....	34
5.6. Componentes del planeta tierra y distribución del agua.....	34

5.6. Mantos Acuíferos.....	37
5.7. Reservas de Agua Subterránea en Colombia .....	39
5.7.1. Sistemas Acuíferos inventariados en Colombia: Provincias Hidrogeológicas .....	40
5.7.2. Zonificación hidrográfica Área Magdalena – Cauca .....	41
5.7.3. Sistemas Acuíferos inventariados en Colombia:.....	42
5.7.4. Ubicación del área de interés .....	46
5.8. Cuenca Hidrográfica .....	48
5.9. Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos .....	49
5.10. Energía Eléctrica.....	51
5.11. ENOS (ENSO). El Niño Oscilación del Sur .....	52
5.12. Variabilidad climática .....	55
6. Marco Teórico.....	57
6.1. Exploración, localización y caracterización de acuíferos .....	57
6.1.1. Etapa 1. 57	
6.1.2. Etapa 2. 57	
6.1.2.1. Exploración geofísica:.....	58
6.1.2.2. Reconocimiento Hidrogeológico. ....	58
6.1.2.3. Perforaciones Exploratorias. ....	59
6.1.2.4. Evaluación hidrodinámica,.....	59
6.1.2.5. Caracterización hidro-geoquímica, .....	59

6.1.2.6. La evaluación hidrológica.....	60
6.1.2.7. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación. ....	60
6.1.2.8. Modelo hidrogeológico conceptual.....	61
6.1.2.9. Modelo matemático .....	61
6.1.3. Etapa 3.	61
6.2. Aproximación al estudio de los Acuíferos.....	61
6.2.1. Infiltración y recarga.....	62
6.2.2. Determinación de la recarga .....	63
6.2.2.1. Medidas directas. ....	63
6.2.2.2. Balance hídrico. ....	63
6.2.2.3. Trazadores.....	64
6.2.2.4. Aproximaciones de Darcy.....	64
6.2.2.5. Empíricos. ....	64
Ecuación de Cheerturvedi: .....	65
Ecuación de Sehgal:.....	65
Ecuación de Turc: .....	65
6.2.3. Conceptos de caudal y bombeo.....	66
6.2.4. Morfología de acuíferos y tipos de recarga.....	66
6.2.5. Tipos de acuíferos. ....	67
6.2.6. Enfoque por ecosistemas como fundamento de planificación .....	68



6.2.7. Principios del enfoque por ecosistemas. ....	69
6.3. Centrales Hidroeléctricas .....	71
6.3.1. De acuerdo con el tipo de Turbinas: .....	71
6.3.2. De acuerdo con el Uso del agua:.....	72
6.3.2.1. Centrales de Agua Fluente, de agua corriente, o de agua fluyente. ....	72
6.3.2.2. Centrales de Agua Embalsada: .....	72
6.3.2.3. Centrales de Regulación: .....	73
6.3.2.4. Centrales de Bombeo .....	73
6.3.3. De acuerdo con el Salto Hidráulico: .....	73
6.3.3.1. Centrales de Alta Presión:.....	73
6.3.3.2. Centrales de Media Presión: .....	74
6.3.3.3. Centrales de Baja Presión: .....	74
6.3.4. De acuerdo con las Presas:.....	74
6.3.4.1. Presas de gravedad.....	74
6.3.4.2. Presas de bóveda .....	75
6.3.4.3. Presas de contrafuertes.....	75
6.3.4.4. Presas de elementos sin trabar .....	75
6.4. Aproximación Teórica sobre las interacciones del suelo con el ecosistema.....	76
6.4.1. Fuerzas de filtración y gradiente crítico.....	77
6.4.2. Fuerzas de Tubificación y sifonamiento .....	78

	10
6.4.3. La capilaridad.....	79
6.4.4. Principio de Arquímedes y Principio de Pascal (Vasos comunicantes).....	81
6.4.5. Física del afloramiento de aguas.....	84
6.4.6. Presión atmosférica o barométrica.....	86
7. Estado del Arte.....	89
7.1. Zona Hidrogeológica Valle Medio del Magdalena.....	89
7.2. Sub-cuenca del río La Miel en la ZH del VMMC.....	92
FORMATO DE REGISTRO DE POZOS DE MONITOREO Y EVALUACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	96
1. Sistema de acuíferos Valle Medio del Magdalena.....	97
2. Sistema de acuíferos Mariquita-Dorada-Salgar.....	97
3. Sistema de Aguachica.....	97
7.3. Malla hídrica del departamento de Caldas.....	99
8. Antecedentes.....	101
8.1. Internacional.....	102
8.2. Regional.....	107
8.2.1. Grupos de estudio de Hidrogeología en Colombia.....	108
8.2.2. Temáticas más abordadas en la investigación de la Hidrogeología.....	108
9. El ciclo hidrológico.....	109
9.1. Subsistemas del ciclo hidrológico.....	109
9.2. Hidrogeología: El tejido subterráneo entre el suelo y el agua.....	111

9.3.	La Pequeña Central Hidroeléctrica El Edén y su Licencia Ambiental. Un proyecto ejecutado	113
9.4.	La Pequeña Central Hidroeléctrica de Montebonito y su Licencia Ambiental. Un proyecto en proceso.....	118
9.5.	Los Impactos Ambientales de las PCH.....	122
9.6.	Caracterización hidrogeológica de los suelos en la zona intervenida con los túneles de las PCH El Edén y Montebonito. ....	123
10.	Marco Legal.....	126
11.	Metodología.....	128
11.1	Tipo de Investigación.....	128
11.2	Población.....	128
11.3	Selección de documentos.....	128
11.4.	Análisis de documentos.....	128
12.	Resultados.....	129
12.1.	Documentos Seleccionados.....	133
13.	Conclusiones.....	138
14.	Recomendaciones.....	142
	Referencias Bibliográficas.....	144
	Anexo A: Regulación Hídrica (porcentaje fichas de estudio).....	147

### Lista de Tablas

Tabla 1: Ficha Técnica de la PCH El Edén.....	19
Tabla 2 Inventario Hídrico de la Cuenca Río La Miel.....	22
Tabla 3 Estructura para la ordenación y manejo de las CHA Fuente: (MINAMBIENTE, 2014)	49
Tabla 4- Zona Hidrológica Valle Medio del Magdalena Fuente: (IDEAM, Mayo, 2015).....	92
Tabla 5- Esquema de trabajo IDEAM en Hidrogeología. Fuente: (Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial , Mayo 21 - 22 de 2009) .....	94
Tabla 6- Formato de registro de pozos - Fuente: (Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial , Mayo 21 - 22 de 2009) .....	96
Tabla 7- Registro de datos de pozos - Fuente: (Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial , Mayo 21 - 22 de 2009) .....	95
Tabla 8 Estudios sobre hidrogeología en Colombia - Fuente: Bibliografía consultada .....	108
Tabla 9 - Balance hídrico Cuenca Río La Miel Fuente: (Quiroga, Julio, 2016).....	118

## Lista de figuras

Acuíferos y zonas de Recarga en el departamento de Caldas.....	92
Anatomía de la Tierra .....	30
Área de Interés de la monografía .....	41
Azud en la bocatoma.....	107
Caracterización de la Provincia hidrogeológica del Valle Medio del Magdalena.....	91
Casa de máquinas.....	109
Ciclo del agua en la naturaleza .....	50
Codificación de las cuencas según el SCEI .....	40
Cómo funciona la capilaridad .....	74
Demostración del Principo de Arquímedes .....	76
Elaboración propia a partir de extractos de Cartografía .....	37
Escorrentía ZH Magdalena-Cauca.....	84
Esquema de una PCH.....	22
Esquema Trazado del Túnel PCH El Eden.....	19
Estructura de un Acuífero .....	78
Estructura hidrológica del Valle Medio del Magdalena .....	82
Estructura según el Sistema de Codificación Estándar Internacional.....	40
Índice de Aridez por zonas Geográficas en Colombia.....	31
Interior del túnel.....	109
Laboratorio Pruba de capilaridad.....	73
Movimiento del agua subterránea.....	57

Portal de entrada .....	107
Principio de Arquímedes y Principio de Pascal .....	75
Recarga de Acuíferos .....	78
Sistemas Acuíferos de Colombia .....	38
Sistemas acuíferos de las provincias hidrogeológicas montanas e intramontanas de Colombia..	35
Sub-zonas hidrográficas CORNARE.....	42
Tanque de recarga. Salid de la tubería de conducción.....	108
Temperatura Océano Pacífico.....	49
Transporte del agua del suelo a las hojas.....	73
Tunel de conducción. ....	108
Vista general de la infraestructura de captación .....	107
Z. H Magdalena – Cauca. ....	83
Zona de captación - .....	106
Zonificación Hidrográfica del Área Magdalena - Cauca .....	36

### **Lista de Anexos**

Anexo A: Regulación Hídrica (porcentaje fichas de estudio) .....	147
--	-----

## Resumen

Los bienes y servicios ambientales de las montañas andinas son un atractivo para la generación energética. Una presa o azud al costado del río, conduce el agua a un túnel que excavado en las montañas por varios kilómetros bajo tierra hasta llegar a un tanque de descarga aprovechando el gradiente topográfico. En su recorrido, el túnel intercepta mantos acuíferos, rompe la estructura conectiva del suelo, mientras el azud reduce el agua disponible en el cauce.

En este cruce subterráneo se interceptan sistemas de acuíferos que pierden de su estructura la continuidad de sus fuerzas ascendentes que alimentan la oferta de agua en los nacimientos. La ruptura de esta continuidad no solo suspende el suministro del líquido a las capas superiores del suelo, sino que afecta la humedad relativa y el balance hidrológico de la zona, propiciando condiciones de sequía irreversibles.

Con ello es posible que las infraestructuras establecidas y las proyectadas construir en el oriente de Caldas utilizando la técnica a filo de agua con túnel, propia de las pequeñas centrales hidroeléctricas, PCH, realmente ocasionan un daño ambiental irreversible, con consecuencias en la productividad del suelo, la escasez de agua, el ciclo hidrológico y el caudal ecológico de las fuentes de agua desviadas.

**Palabras Clave:** Regulación hídrica, Percolación, Escorrentía, Evapotranspiración, Balance hídrico, Aguas Subterráneas, mecánica de fluidos, Ley de Darcy.

## Abstract

The environmental goods and services in the Andean Highlands are an attraction for power generation. A dam or weir on the side of the River, water leads to tunnel dug into the mountains by several kilometers under the ground until you reach a discharge tank, taking advantage of the topographic gradient. In his tour, tunnel intercepting aquifers, breaks the cohesive soil structure, while the dam reduces available water in the riverbed.

In this underground crossing intersect aquifer systems that lose their structure the continuity of their upward forces that feed water supply in births. The breaking of this continuity not only suspended the supply of fluid to the upper layers of the soil, but it affects the relative humidity and the water balance of the area, leading to irreversible drying conditions.

Thus it is possible to established infrastructure and the planned to build in the East of Caldas using the edge of the water tunnel, own of the small hydroelectric, PCH, actually cause irreversible environmental damage, with effects on the productivity of the soil, water scarcity, the hydrological cycle and the ecological flow of diverted water sources.

**Keywords:** Water regulation, percolation, runoff, evapotranspiration, water Balance, groundwater, fluid mechanics, Darcy law.



## Introducción

La evidente fragmentación de los ecosistemas como síntoma de la patología de su detrimento y la reiteración de los desastres asociados con la pérdida de suelos, la reducción de la oferta hídrica, las alteraciones climáticas, el incremento del riesgo de extinción que afecta numerosas especies de flora y fauna, es una alerta generalizada que data de un poco más de tres decenios, no obstante lo cual, aún se carece de medidas con resultados eficientes para la recuperación y la restauración de las áreas y zonas de interés ambiental que conlleve a la recuperación de su equilibrio.

La necesidad de investigación demarcada por la ética, que profundice en la comprensión de la mecánica funcional de los procesos ecológicos en la interacción de los ciclos vitales que se desarrollan en la intimidad del laboratorio natural, es una prioridad en momentos donde la crisis ambiental presiona por acciones ciudadanas que han visto frustrado su derecho a tener un ambiente sano y equilibrado.

Como consecuencia de falta de controles o por decisiones adoptadas por actores de la vida pública que con el pretexto del “*desarrollo*” han dado viabilidad a las acciones que finalmente resultaron ser depredadoras, resulta lamentable que el momento en que el daño se evidencia, los actores que facilitaron los mecanismos para el detrimento ocasionado, ya no son sujetos de las acciones legales de reparación ni de responsabilidades.

Ello se evidencia en la ausencia de responsables por el deterioro en la oferta ambiental (*Radio, 2017*) que ha sobrevenido luego de intervenciones realizadas en el territorio del departamento de Caldas donde se ha otorgado el licenciamiento y con ello la viabilidad a proyectos de generación de electricidad mediante Pequeñas Centrales, que obtienen la caída de agua mediante el desvío del líquido a través de un túnel de conducción que por varios kilómetros reduce el caudal ecológico

de la fuente de agua intervenida a la vez que los cortes del subsuelo interrumpe la comunicación entre la superficie del terreno y los mantos acuíferos que alimentan los nacimientos de agua.

Un proceso vital en la naturaleza con mayor exposición y sensibilidad al impacto de las acciones antrópicas es el ciclo hidrológico, que a las transformaciones del territorio entrega respuestas extremas (*International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2003*). Desde riesgos de escasez hasta pluviosidades súbitas, acompañadas de extremos en los otros ecosistemas como sequía de suelos, incendios, desaparición de fuentes hídricas, atmósfera con altas temperaturas y brillo solar a momentos de sobresaturación de laderas acompañadas de bajas temperaturas y nubes espesas, con la ocurrencia de desastres como inundaciones, desbordamiento ríos, deslizamientos e inestabilidad de suelos.

Esas alteraciones del hábitat son condiciones temporales asociadas con el Evento del Pacífico Sur, fase cálida o Niño, o en su fase fría o Niña, también conocida como ENSO, (*ClimateandSociety, 2017*) pero el evento que es objeto de esta investigación está lejos de ser consecuencia de cambio climático, porque al variar el tiempo, otras fuentes han recuperado su oferta hidrológica mientras las comunidades habitantes del territorio, informan que sus fuentes abastecedoras desaparecieron. (*Atehortua, 2016*)

De esa forma, tras una revisión bibliográfica, la presente investigación se concentra en la infraestructura de túnel que conduce el agua captada en las proporciones de masa y fuerza de caída necesarias para mover las turbinas en las pequeñas centrales hidroeléctricas, a propósito de identificar los efectos de los cortes subterráneos en la oferta hídrica con afloramiento en superficie, tomando como estudio de caso la PCH El Edén en Bolivia – Caldas.

## FICHA TECNICA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

*Fuente: (Inficaldas, 2014)**Fuente: (CORPOCALDAS, 2015)*

Nombre	El Edén
Ubicación	Bolivia - Caldas
Generación	20 MW
Titular de la Licencia	Proyecto Hidroeléctrico El Edén S.A.S
Licencia Ambiental	Resolución 173 del 4 de mayo de 2011
Autoridad Ambiental	Corporación Autónoma Regional de Caldas CORPOCALDAS. Expediente 1416
Área expropiada	40 Ha de suelos
Vocación de permanencia	50 años
Longitud del túnel	6 km a partir del portal de entrada a 1600 msnm hasta el portal de salida a 500 m de altura respecto del punto de entrega de aguas turbinadas al cauce a 1158 msnm.
Secciones de corte	3 m de altura x 3 m de ancho
Tipo de estructura	A filo de agua
Empleos	Durante la construcción 380 empleos directos
Ejecutor de obras	Sociedad UT – GC- CHOC conformada por:
Cuenca proveedora	<i>Latinco S.A, Estyma SA y Estructuras Metálicas S.A.</i> Río Samaná
Corriente	Río La Miel

*Tabla 1: Ficha Técnica de la PCH El Edén*

## 1. Generalidades

### 1.1. Planteamiento del Problema: Contexto.

El acceso al agua se satisface por diversas comunidades a partir de la oferta de su mismo territorio, de manera que su reconocimiento jurisprudencial como derecho fundamental (*Derecho fundamental al agua, 2014*) universal lo que hace es ratificar y proteger esas costumbres de los pueblos.

Sin embargo, la reducción del agua disponible para el consumo humano en diversos lugares del planeta así como la generosidad rentística del sector eléctrico, ha puesto de relieve el amplio portafolio de negocios que ofrece un territorio con abundante oferta hidrológica.

Las comunidades han sido excluidas de la toma de decisiones respecto de sus fuentes abastecedoras, estado ausentes de estas mesas en las que extraños se han distribuido el territorio para su beneficio, pero finalmente las involucran en sesiones de trabajo donde se les informa las decisiones que se han tomado, las que en ese momento y en muchos casos ya cuentan con licenciamiento.

De esa forma los foráneos acreditan el requisito de la participación ciudadana en la toma de decisiones que afecta a las comunidades para obtener licenciamiento de las obras: Aportando el acta de las reuniones, firmada por los asistentes a ellas.

#### 1.1.1. Descripción del Problema

Las caídas de agua o cascadas tienen especial importancia en la generación de electricidad pues la gravedad provee la fuerza mecánica para mover las turbinas. Para lograr esa fuerza

mecánica se requieren unas masas de agua y altura suficientes que hagan operar la infraestructura, y por ello es necesario construir túneles subterráneos de longitudes variables, que aprovechan el gradiente topográfico.

El sector hidroeléctrico interconectado, vincula varias pequeñas centrales generadoras de energía algunas ya establecidas, otras en proyecto de construcción en las montañas andinas, viabilizadas bajo el argumento de fuente de desarrollo al amparo de un licenciamiento ambiental, corto en el análisis del impacto integral que la infraestructura en túnel deja en el ecosistema subterráneo, con lo que esta monografía analiza una posible relación entre la reducción hasta la desaparición de nacimientos y la construcción del túnel de desvío.

La Pequeña Central Hidroeléctrica El Edén en Bolivia - Caldas, fue presentada como una inofensiva obra de desarrollo amparada con licencia ambiental, que al transcurrir el tiempo ha mostrado con certeza, que luego de la perforación, los predios sobre la línea del túnel han visto desaparecer la oferta de agua en los nacimientos, pérdida de humedad en los suelos y alteraciones en el ciclo del agua.

Visto de ese modo, los criterios consignados en la licencia posiblemente se apartan del marco de la Convención de RAMSAR, (*Naciones Unidas, 1994*), vigente en Colombia desde 1988, que en la 8ª Conferencia de la Partes realizada en 2002, reconoció la necesidad de comprender las interrelaciones entre los humedales y las aguas subterráneas por lo que mediante Resolución VIII.1 pidió al Grupo de Examen Científico y Técnico (GECT) de la Convención, examinar la función de los humedales en la recarga y el almacenamiento de aguas subterráneas y la función de estas en el mantenimiento de las características ecológicas de los humedales, los efectos de su absorción en los humedales y elaborar los lineamientos correspondientes.

De acuerdo con el modelo numérico hidrogeológico basado en el modelo de flujo MODFLOW que representa en forma aproximada el comportamiento del régimen natural de las aguas subterráneas en la zona donde se construyó el túnel de la PCH El Edén, los flujos de interacción del sistema acuífero en la sub-cuenca del río La Miel registra los siguientes tributos:

Cuenca Río La Miel				
Corriente	Zona de Balance	Estacionario		
		Flujo de Aporte del Cauce al Acuífero	Flujo de Aporte del Acuífero al Cauce	Balance de Aportaciones
		(m <sup>3</sup> /día)	(m <sup>3</sup> /día)	(m <sup>3</sup> /día)
R. La Miel	Zona 10	0.4200	2175	2174.580
Q. El Aguacate	Zona 12	0.8162	27.823	27.007
Q. El Filón	Zona 13	0.0330	29.532	29.499
Q. El Aguila	Zona 15	0	30.808	30.808
Q. Bolivia	Zona 21	0	7.634	7.634
Q. La Bomba	Zona 22	0.0033	3.283	3.279
Q. La Primavera 3	Zona 27	0.0018	1.015	1.013
Q. Patio Bonito	Zona 23	0.0825	6.091	6.008
Q. La Esmeralda	Zona 25	0.0102	0.120	0.109
Q. El Jardín	Zona 29	0.0003	0.709	0.709
Q. El Guadual	Zona 30	0.0030	1.022	1.019
Q. La Chonta	Zona 34	0	4.075	4.075
Q. La paterana	Zona 33	0.1080	26.204	26.096
Q. Alegría	Zona 39	0.3600	53.006	52.646
Q. El Diamante	Zona 40	0.0250	32.771	32.746
Q. El Recreo	Zona 41	0.0081	26.010	26.002
Q. La Siria	Zona 43	0	7.087	7.087
Q. La Balastrea	Zona 45	0	28.985	28.985
Q. El Alto	Zona 46	0	2.232	2.232
Q. El Higuierón	Zona 44	0.0124	8.929	8.916

*Tabla 2 Inventario Hídrico de la Cuenca Río La Miel*

Fuente: (Quiroga, Julio, 2016)

La Estrategia 1.7 del Plan Estratégico 2003 – 2008 estableció sobre el Manejo Integrado de los Recursos Hídricos “*Garantizar que las políticas y la aplicación del Manejo Integrado de los Recursos Hídricos (MIRH), conforme a un enfoque por ecosistemas, queden integradas en las actividades de planificación de todas las Partes Contratantes así como en sus respectivos procesos de adopción de decisiones, particularmente en lo tocante al manejo de las aguas subterráneas (...)*”.

Con lo expuesto, el problema de investigación se centra en explicar si los cortes que dejan los túneles de las infraestructuras de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas a filo de agua, ocasionan el detrimento ambiental que afecta nacimientos de agua, la humedad relativa y el ciclo del agua.

### **1.1.2 Pregunta Problema.**

Acorde a los hechos anteriormente descritos, esta monografía busca responder a la pregunta: *¿Las infraestructuras en túnel de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas a filo de agua, afectan el ciclo del agua?*

## 2. Justificación

Más que analizar si efectivamente la infraestructura hidroeléctrica trajo “*desarrollo*” al corregimiento de Bolivia, como causa que justificó la afectación de utilidad pública que recayó sobre los inmuebles expropiados, si es preciso decantar cómo los moradores de este territorio, antes que evidenciar progreso para sus familias y predios, lo que han encontrado es una pérdida de bienes y servicios ambientales que beneficiaban a varias veredas y que desaparecieron luego de la construcción de los túneles.



Fuente: (CORPOCALDAS, 2015)

Entre esos bienes y servicios ambientales cuya oferta desapareció o se redujo, se encuentra la oferta hídrica en los nacimientos y el incremento de la vulnerabilidad de los terrenos. De ello quedó el cuestionamiento de si las obras que se ejecutaron para el trazado del túnel que sirve a la central hidroeléctrica, en su diseño tuvieron la valoración integral del impacto ambiental bajo el “*enfoque por ecosistemas*” (PNUMA - UN, 2004).



Esa posible correlación entre pérdida de bienes y servicios ambientales en simultaneo con la construcción de las infraestructuras de la Pequeña Central Hidroeléctrica PCH El Edén del corregimiento Bolivia - Caldas, centra el problema de interés puesto que la pérdida de los nacimientos de agua y la reducción de la humedad en los suelos en las veredas Patio Bonito y La Soledad se atribuyen como efectos sobrevinientes a la construcción del túnel de desvió y traslado de las aguas desde el río La Miel hasta el tanque de carga.

Preservar el equilibrio ambiental es una de las metas del Objetivo 15 de los Objetivos del Milenio que textualmente señala:

*Objetivo 15: Promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y frenar la pérdida de la diversidad biológica.*

Muchos proyectos que en Colombia se han valorado e impuesto a las comunidades como propuestas de interés público porque presuntamente brindan aportes al desarrollo local, hoy requieren ser revaluadas, dadas las consecuencias sociales, económicas y ambientales que han sobrevenido luego de su ejecución, en especial por su posible vinculación con una sensible reducción de la oferta hídrica en zonas rurales donde los nacimientos constituían las principales fuentes de abastecimiento de agua para consumo doméstico y regadío.

Por esta razón es que la presente investigación es de gran importancia en la construcción de conocimiento para la Universidad Nacional Abierta y a Distancia, debido a que además de dar orientación a las comunidades, también es útil como referencia para prevenir el daño ambiental y en otros casos buscar alternativas para el restablecimiento ambiental del ciclo del agua.

### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo General

Analizar la vinculación de los túneles de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas con el ciclo del agua: Estudio de Caso El Edén – Bolivia – Caldas.

#### 3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Revisar la Evaluación de Impactos Ambientales que dieron lugar a licencias para dos infraestructuras de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en Caldas.
- ✓ Compilar la caracterización hidrogeológica de los suelos donde se excavaron o planean excavar los túneles de estas infraestructuras.
- ✓ Verificar información sobre el inventario de oferta hídrica antes y después de la intervención de la PCH El Edén.
- ✓ Evidenciar y caracterizar posibles impactos derivados de los cortes o excavaciones de túneles que asocien cambios en el ciclo del agua.

#### 4. Hipótesis

Proyectos que como las generadoras hidroeléctricas que en el departamento de Caldas han sido considerados de utilidad pública, aprovechan la abundante oferta hídrica de las montañas andinas y los gradientes topográficos de la cordillera central, requieren de obras invasivas del ecosistema suelo como ocurre con los túneles por donde se desvían las aguas captadas en volumen y altura necesarias para formar el hilo de cascada y la fuerza para mover las turbinas generadoras.

Ellas atienden al siguiente diseño:



Fuente: (Vargas, 2014)

Si las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, en verdad fuesen solo una infraestructura a filo de agua, la teoría como queda expresa, pasaría sin dar lugar a impactos en el subsuelo excavado luego de las intervenciones correspondientes a la construcción de los túneles y la comunidad habitante de estos territorios no tuviesen razones para formular reclamaciones por los cambios que se han evidenciado en sus predios.

Pero la realidad es que con posterioridad a las intervenciones en las que se hizo la construcción de los túneles, las respuestas de los terrenos no se hicieron esperar y se registraron cambios en el comportamiento ambiental como la desaparición de nacimientos y reducción de la humedad en los suelos. Ello ratifica que el suelo y el subsuelo son mundos complejos e interrelacionados como un ecosistema (Reyes, 2011), con gran incidencia en la oferta hídrica superficial y sub\_superficial, dinámicas que requieren mayor conocimiento. (*Instituto Tecnológico Geominero de España, 1992*)

Lo expuesto significa que es necesario validar o descartar la hipótesis que endilga a este tipo de tecnología como el hecho causal de la desaparición de nacimientos de agua, la disminución de la oferta hídrica y modificaciones en la climatología de lugares como Bolivia en jurisdicción del municipio de Pensilvania – Caldas donde se estableció la Pequeña Central Hidroeléctrica El Edén reiterando que esos mismos impactos en el medio natural también pueden sobrevenir en territorio de los municipios de Manzanares – Marulanda – Fresno, con motivo de la Central Hidroeléctrica Montebonito.

El ejercicio académico consiste en hallar en qué medida puede aceptarse que la reducción de los afloramientos de agua en numerosos predios situados en las zonas intervenidas con los túneles para las PCH, corresponde a manifestaciones asociadas con el Cambio Climático, o por el contrario, si ello corresponde a la respuesta natural del ecosistema suelo intervenido ante la ruptura de las estructuras físicas que responden a la mecánica de fluidos.

## 5. Marco Conceptual

### 5.1. Cambio Climático

Hablar del clima es hacer referencia al estudio y análisis de los procesos que ocurren en la atmósfera a partir de valores promedio de las variables representativas que son valoradas tras su observación y seguimiento por largos períodos de tiempo, normalmente mayores o iguales a 30 años. Estas variables se conocen como *Normales Climatológicas*. (BIC - BONCOLDEX, 2012)

El cambio climático es una variación importante del estado medio del clima que persiste durante un largo período de tiempo, generalmente decenios y hasta más tiempo, que puede obedecer a procesos internos del medio natural, o por cambios derivados de presiones externas, o por cambios introducidos por el hombre en forma persistente, logrando cambiar la composición de la atmósfera, o por cambios en los usos de la tierra.

La Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, define éste como un cambio en el clima, atribuible directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera terrestre y la variabilidad climática que se atribuye a causas naturales. (*Unidad Coordinadora del Primer Informe Bienal de Actualización de Colombia, 2015*)

Como el sistema climático no es lineal, hay comportamientos en los que el cambio puede suceder en forma rápida, sorpresiva o repentina, no prevista, como la retirada de los glaciares, l la masiva fusión del permafrost (*Unidad Coordinadora del Primer Informe Bienal de Actualización de Colombia, 2015*) cuya consecuencia serian cambios acelerados en el ciclo del carbono, dados en extremos donde siendo no lineal serían de difícil a imposible modelación y predicción.

De esa manera se incrementa el riesgo por exposición a desastres con magnitudes imprevistas,

que superan los coeficientes de resistencia bajo los cuales se modelan y construyen las infraestructuras de uso público y privado, haciendo cada vez más difícil la predicción de la amenaza y más vulnerables las poblaciones, mientras la humanidad se encuentra más preocupada del dinero. (*MinutoDeFisica, 2017*)

## **5.2. Cambios en el uso de la tierra**

Las transformaciones sensibles en el uso de la tierra van desde la conservación en bosques nativos que favorecen la oferta de agua, su deforestación para uso agrícola, o la extensión de sabana para ganadería, lo que introduce cambios en las coberturas de la tierra y con ello cambios e impactos en el albedo terrestre, modificaciones en el balance hidrológico, especialmente en la evapotranspiración, modificaciones en la capacidad del ecosistema como fuente y sumidero de los gases de efecto invernadero entre otros efectos en el sistema climático local y global. (BIC - BONCOLDEX, 2012)

La determinación de esos usos tradicionalmente la ha dado el propietario, pero en la época reciente y por mandato constitucional, la propiedad hoy debe cumplir una función ecológica y social, por lo que el uso del suelo lo determina el respectivo Plan de Ordenamiento Territorial de la municipalidad donde se localiza el predio, lo que favorece las acciones que pueden tomar los gobiernos en desarrollo de planes de adaptación que conduzcan a la mitigación de los efectos del cambio climático.

No obstante, si al entrar en vigencia la definición de los usos del suelo, un predio ya ha iniciado un uso que se encuentra en proceso de fijación o aprovechamiento, la ley colombiana tiene prevista la figura de derechos adquiridos, que van hasta el momento final de la vida útil del proyecto, lo que constituye un factor negativo para los esfuerzos que en materia de adaptación emprenda la

administración pública, porque los particulares carecen de la mínima disposición a renunciar a un aprovechamiento que le resulta rentable, o por lo menos aprovecharlo hasta el final de su producción. (*León, 2005*)

De acuerdo con la Constitución Política de Colombia, el territorio colombiano con los bienes públicos que forman parte de él, le pertenecen a la Nación, pero el propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables, le pertenecen al Estado. (*Primario, 1991*), razón por la cual, la concesión de los usos del subsuelo son otorgados por el gobierno central.

Pero esa condición bajo la cual desde la centralidad se desconoce la definición de los usos del territorio en los planes de ordenamiento que aprueban los Concejos Municipales, está acompañado de la Responsabilidad por el daño que las comunidades no están en la obligación de soportar, cuando ellas no han sido escuchadas en la definición de los aprovechamientos del territorio y sobrevienen modificaciones en la seguridad del hábitat y en las funciones del ecosistema.

### **5.3. Desertificación**

Definida como la pérdida sobreviniente sobre la fertilidad, disponibilidad de suelo productivo, así como de bienes y servicios ambientales, es una de las amenazas con mayor incidencia que registra el cambio climático y la variabilidad del clima.

La degradación de los suelos no solo se registra en las tierras situadas en zonas áridas o semiáridas. Ella también puede sobrevenir en zonas subhúmedas como resultado de diversos factores naturales como el clima, pero también como consecuencia de factores antrópicos como el urbanismo, la industria y el desarrollo de infraestructuras de servicios públicos.

La Desertificación o degradación de las tierras consiste en la pérdida de suelos, o en la

reducción de la productividad biológica o económica asociada con la complejidad de las tierras de cultivo, incluyendo pastizales y bosques (*United Nations Convention to combat desertification, 2014*), que en el caso de ser resultado de las actividades humanas también se analizan las pautas de asentamiento, donde se hace evidente en fenómenos como:

- ❖ *Erosión y erodabilidad del suelo* causada por el viento y/o por el agua, debido a la pérdida de las propiedades de resistencia.
- ❖ *Improductividad sobreviniente* a causa del deterioro de las propiedades físicas, químicas, biológicas del suelo.
- ❖ *Desaparición o pérdida de vegetación natural* a mediano y largo plazo.
- ❖ *Incremento de especies amenazadas de extinción, y/o extinción de especímenes de fauna y flora.* Consecuente con la desaparición de bosques y cobertura nativas.
- ❖ *Incremento del albedo*
- ❖ *Contaminación visual por deterioro del paisaje*
- ❖ *Reducción y/o pérdida de la capacidad de fijación de carbono.*
- ❖ *Afectación en los ciclos naturales del agua, del carbono, del fósforo, del nitrógeno entre otros.*

#### **5.4. Sensibilidad del clima**

El equilibrio climático puede entenderse como el punto aquel donde se encuentran las variaciones de la temperatura media de la superficie terrestre en todo el planeta, pero que puede variar de manera inusual a causa de la duplicación de la concentración de gases traza como el CO<sub>2</sub> atmosférico o de CO<sub>2</sub> equivalente. A esta posible súbita variación se le denomina sensibilidad.

El Quinto Informe del Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático alerta sobre las evidencias que se registra en la oferta hídrica, en la siguiente forma:



*“Las proyecciones indican que el cambio climático hará que se reduzcan los recursos de aguas superficiales y aguas subterráneas renovables en la mayoría de las regiones secas subtropicales (evidencia sólida, nivel de acuerdo alto), con lo que se intensificará la competencia por el agua entre los sectores...”* (PNUMA - OMM, 2015)

De acuerdo con estos elementos, la sensibilidad del clima es la medida de respuesta que tiene el sistema climático ante un forzamiento radiativo<sup>1</sup> sostenido, que si es de naturaleza positiva aporta calentando la superficie terrestre y si fuese negativo lo hace para enfriarla. Su variación se mide en °C/Wm<sup>2</sup>.

El Panel de Expertos en Cambio Climático definió el forzamiento radiativo como un indicador del calentamiento promedio del planeta en condiciones de equilibrio, resultado de la duplicación de los niveles de concentración de CO<sub>2</sub> cuya estimación requiere la realización de simulaciones de circulación.

La Sensibilidad Climática efectiva que se realiza para verificar condiciones de desequilibrios en evolución, mide la fuerza de las respuestas que da el clima en momentos determinados y que pueden variar en el registro histórico de los forzamientos y la situación del clima.

La variabilidad del clima se focaliza en los cambios de los datos promedio del estado del clima debido a procesos internos del sistema climático, o forzamientos externos. Es cuando acontecen

---

<sup>1</sup> Se denomina forzamiento radiativo al cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra medido en el borde superior de la troposfera (a unos 12.000 m sobre el nivel del mar) como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar. Se expresa en W/m<sup>2</sup>. (Green Facts, 2017)

fenómenos extremos o desviaciones típicas en diferentes escalas de tiempo y espacio, diferentes de los fenómenos meteorológicos.

### **5.5. Sequía**

Cuando las precipitaciones se comportan por debajo de los niveles normales o promedio de los registros históricos, sobrevienen desequilibrios en la hidrología, afectando en forma negativa los ecosistemas terrestres y la productividad de los suelos.

La sequía se relaciona con la desertificación, porque es el primer evento que antecede a la pérdida de fertilidad en los suelos por ausencia de agua en cualquiera de sus estados naturales.

La humedad de los terrenos en la zona andina, se mantiene por efecto del rocío generalmente nocturno propiciado por la niebla a nivel rasante. También contribuyen las brisas y lluvias cuando se infiltran en los suelos, lo que muestra un territorio donde la humedad relativa permite un bajo riesgo de sequía.

Tratándose de disponibilidad de agua o índice de escasez, la región Andina de la Cordillera Central, es prodigiosa en esta provisión ambiental, lo que hace de aquella un codiciado territorio para el establecimiento de infraestructuras generadoras de energía eléctrica. (*Instituto Humboldt - INVEMAR- UN - MBG, Volumen 15 Número 2 - Julio - diciembre de 2014*).

### **5.6. Componentes del planeta tierra y distribución del agua**

Tres componentes en los tres estados de la materia caracterizan al planeta Tierra: Componente Sólido o litosfera conocido como el suelo, el que se encuentra en superficie ocupa un 29% de la superficie del planeta. Un componente líquido o hidrosfera, conocido como agua de la que solo la

contenida en los mares ocupa el 71% de la superficie terrestre y un componente gaseoso o atmósfera llamado aire.

Para estimar la participación de cada componente se requiere calcular la masa del planeta en un proceso donde se aplica la Ley de Newton o Ley de la Gravitación Universal  $F = M \cdot m / r^2$



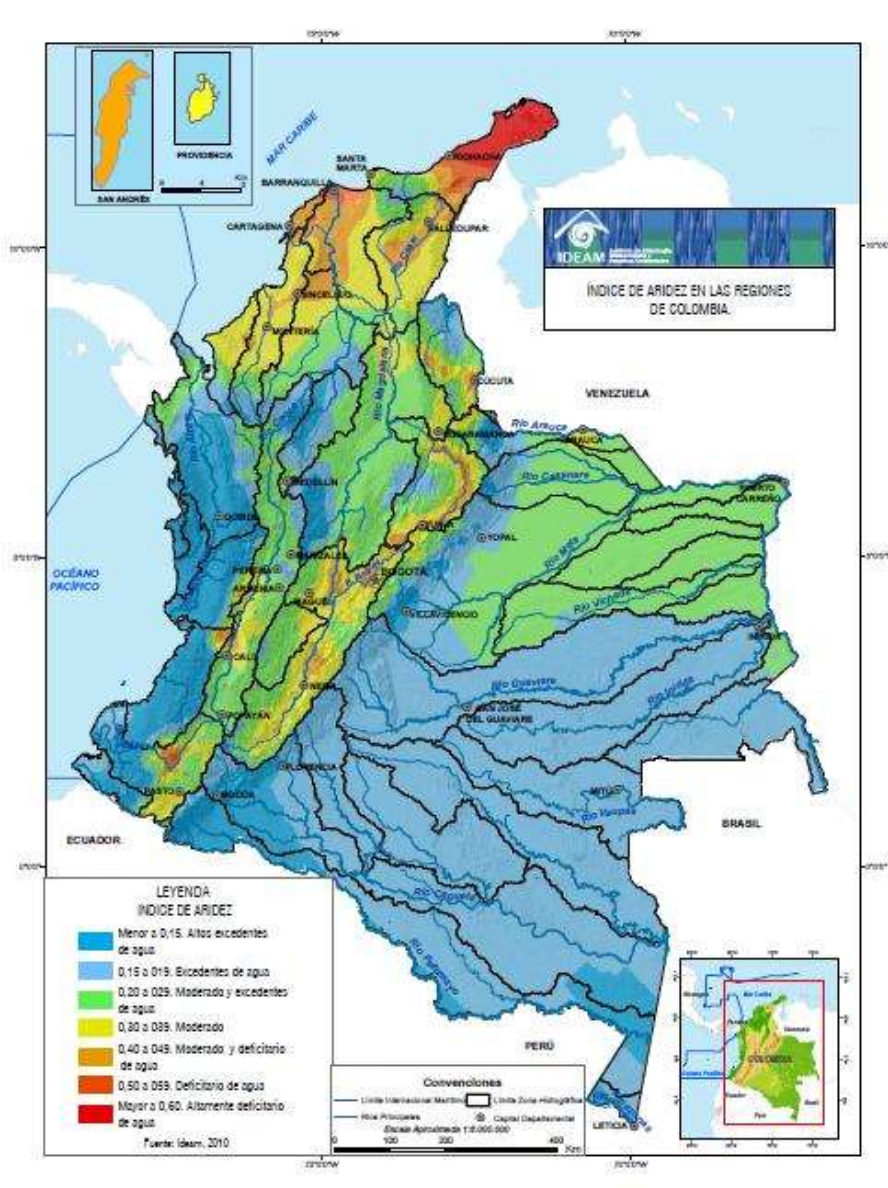
Fuente: (Vallejo, 2012)

Del agua contenida en el planeta, el 97.5% es agua salada y está en los océanos y mares. El 2.5% restante es agua dulce. De ésta, el 69% se encuentra en estado sólido en los glaciales, esto es en los polos y en las nieves perpetuas. (JUMAPAM, 2017).

El 30% del agua dulce se encuentra incorporado en el suelo y en las capas profundas donde anidan los acuíferos. Queda un 1% del agua dulce, la cual se encuentra en superficie en las cuencas hidrográficas en quebradas, ríos, lagos, lagunas, estuarios, entre otras formas de humedales o depósitos, donde circula el agua durante el ciclo hidrológico.

Lo anterior muestra un panorama real de cómo las aguas dulces son escasas, amenazada por la contaminación causada por el incremento de la población y actividad industrial, además en riesgo de escasez.

Si se asocia la Desertificación con la Escasez de agua en Colombia, el IDEAM ha estimado el índice de Aridez por zonas geográficas:



Fuente: (IDEAM, 2010)

Se considera que el Índice de Aridez –IA- es una característica cualitativa del clima con el que mide la suficiencia de las precipitaciones para que los ecosistemas de una región se mantengan. Se calcula a partir del balance hídrico superficial.

En Colombia se han reconocido zonas con alto déficit en la región Caribe y en subcuencas del Área Hidrográfica Magdalena – Cauca y algunas en estado crítico en el Pacífico. Se estima que aproximadamente el 80% de la población colombiana y las actividades económicas del país se localizan en cuencas con déficit natural de agua.

Si se verifica el Balance Hídrico del planeta se encuentra que el 0,007% del agua dulce está disponible para el consumo humano (*Soto, 24 mayo 2017*) y que la forma de abastecer la demanda del líquido en comunidades rurales, se logra acudiendo a los nacimientos.

Los afloramientos de líquido en los nacimientos, son fluidos naturales de agua proveniente de las capas más inferiores de la corteza terrestre, que surgen de un solo punto o desde un área confinada donde se alojan mantos acuíferos que garantizan un territorio con bajo riesgo de sequía.

Lo primero que se entra a comprender es la fuerte conexión entre las aguas en superficie y las aguas subterráneas; en ese caso si se pretende la preservación de estas estructuras, se hace necesario reconocer su funcionamiento para luego entrar a restringir prácticas que arriesguen o terminen con su integridad.

## **5.6. Mantos Acuíferos**

Parte del subsuelo donde se contiene o almacena el agua que se infiltra desde la superficie. Desde allí se mueve en forma muy lenta y mediante flujos subterráneos hacia otras zonas. La

formación acuífera está compuesta por un muro o base de estancamiento y por un techo, que define si el acuífero es libre, semipermeable o impermeable. *(Rodríguez, 3 diciembre 2009)*

Estas masas de agua alojadas en capas subterráneas pueden ser aprovechadas mediante pozos o galerías filtrantes. Pero hasta ahora apenas se analiza las posibles consecuencias derivadas de una sobre explotación de los mantos y el riesgo de desabastecimiento.

La capa freática es teóricamente el acuífero que se encuentra a poca profundidad en una cota sub cero relativa y que tradicionalmente ha abastecido pozos de agua para consumo humano.

Un acuífero confinado o cautivo se caracteriza porque el agua se encierra entre dos capas impermeables y está sometido a una presión distinta a la atmosférica. El agua infiltrada ingresa por una zona donde los materiales son permeables dando lugar a una recarga alóctona<sup>2</sup> directa o indirecta.

El agua subterránea no siempre llena cavidades ni circula por galerías. Ella también puede estar ocupando poros y grietas del suelo, o de las rocas, o sedimentos no consolidados donde los materiales se comportan como esponjas. En el caso de rocas kársticas, estas tienen propiedades que las hacen solubles, por lo que se forman cuevas y vías. *(Rodríguez, 3 diciembre 2009)*

Pero, cómo fluyen las aguas subterráneas para que afloren a tierra?

La zona donde los huecos están llenos de agua se conoce como zona saturada. El nivel freático es el nivel superior de la zona freática expuesta a la presión atmosférica. Aunque puede encontrarse a diferentes profundidades, ello depende de condiciones climáticas y geológicas a las que se

---

<sup>2</sup> La alimentación del manto se presenta por una zona alejada del punto de medición.

encuentre el nivel freático. Normalmente son las condiciones meteorológicas las que inciden en la recarga de los acuíferos y en la profundidad de los niveles freáticos.

Estos no son horizontales y presentan comportamientos irregulares porque tienen una pendiente decreciente monótona que va desde un nivel fijo superior a un nivel fijo inferior. La zona comprendida entre el nivel freático situado por encima de la zona saturada hasta la superficie, se conoce como zona vadosa o no saturada, donde la circulación del agua se da en forma vertical como ocurre con la percolación que es movida por la gravedad.

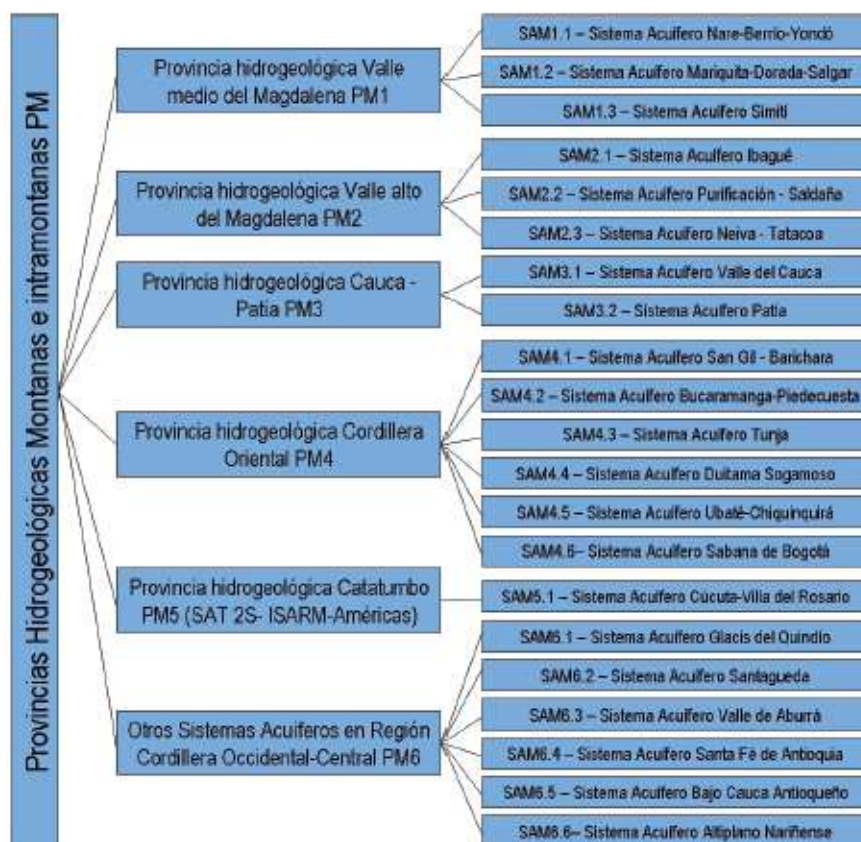
Si el nivel freático supera la presión atmosférica, se está en presencia de un acuífero confinado, en el que el agua tiende a ascender. En ese caso el nivel freático pasa a denominarse nivel piezométrico, y el agua puede llegar hasta la superficie del terreno, incluso hasta superar el suelo dando lugar a un pozo artesiano, aunque esto sucede con escasa frecuencia.

### **5.7. Reservas de Agua Subterránea en Colombia**

Se calcula que las reservas de agua subterránea en las provincias hidrogeológicas ascienden a un volumen total del orden de  $5.848 \times 10^9$  metros cúbicos (5.848 km<sup>3</sup>), tomando información del 74,5% del territorio que está cubierto por la definición de provincias hidrogeológicas. El porcentaje faltante corresponde a ambientes con posibilidades desconocidas, con limitaciones o con acceso restringido. El 52% de las provincias se encuentran en las Áreas de Amazonía, Orinoquía y Chocó, donde hay alto rendimiento hídrico sin una población representativa que demande el uso del agua de este territorio.

Las reservas se calcularon hasta los 3000 metros de profundidad, donde la recarga no es significativa.

### 5.7.1. Sistemas Acuíferos inventariados en Colombia: Provincias Hidrogeológicas



Fuente: (IDEAM, Noviembre, 2013)

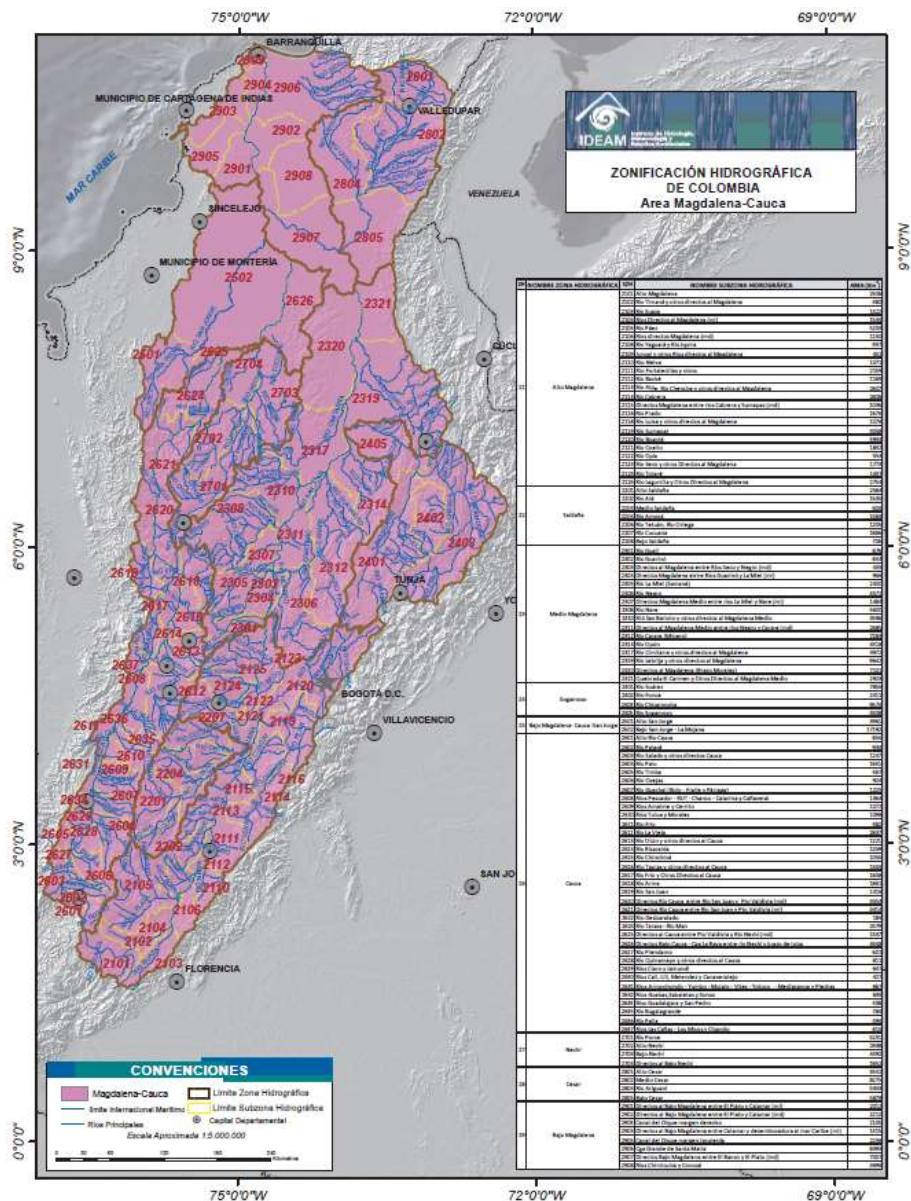
Continuación Tabla 4.2. Características y reservas de las provincias hidrogeológicas.

PROVINCIA HIDROGEOLOGICA	FORMACIONES GEOLOGICAS CON POTENCIAL HIDROGEOLOGICO	TIPO DE ACUIFERO	AREA (km <sup>2</sup> )	Espesor acuífero (m)	Rendimiento específico	RESERVAS (m <sup>3</sup> *10 <sup>12</sup> )
Valle Medio del Magdalena	Depósitos aluviales recientes y de terraza, sedimentos detríticos poco consolidados (areniscas, conglomerados) de la Formación Mesa y el Grupo Real.	Acuíferos libres a semiconfinados en unidades recientes y del Terciario Superior. Libres a confinados en unidades más antiguas.	27.533,52	3500	0,005-0,08	26,08
TOTALES			850.127,56			584,753

Características y reservas de las provincias hidrogeológicas. Fuente (Rodríguez, Vargas, Jaramillo, Piñeros, & Cañas, 2011)



### 5.7.2. Zonificación hidrográfica Área Magdalena – Cauca



Fuente: (IDEAM, Noviembre, 2013)

La zona de interés para este caso el Río La Miel, se localiza dentro de la Zona Hidrográfica del Área Magdalena – Cauca, microzonificada en la sub-zona hidrográfica del Medio Magdalena cuenca del Río Samaná con el código 2305 con un área de 2400 Km<sup>2</sup>.





Fuente: (IDEAM, Noviembre, 2013)

El primer ejercicio de codificación y zonificación hidrográfica en Colombia, lo realizó el Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de tierras –HIMAT- al expedir en el año 1978 la Resolución 0337. Allí se establece por primera vez que el territorio está conformado por cinco Áreas Hidrográficas: 1.Caribe, 2. Magdalena - Cauca, 3.Orinoco, 4.Amazona, 5.Pacífico.

Estas áreas a su vez se dividieron en Zonas Hidrográficas y se subdividieron en Subzonas. Inicialmente el objetivo de esta clasificación fue la adopción de un sistema de codificación para las Estaciones Hidrometeorológicas, pero posteriormente se utilizó en otros estudios y análisis hidrológicos. (IDEAM, 2017)

Desde el decreto 1277 del 21 de junio de 1994, esta clasificación con algunos ajustes de actuación, se aplica a la planificación y ordenamiento ambiental del recurso hídrico en el país además de la política ambiental.

La metodología para delimitar y codificar los territorios hidrográficos también contempló los métodos para la delimitación y codificación hidrogeológica, y lo hizo tomando como referente los procedimientos de la Resolución 0337 de 1978 además de los planos cartográficos análogos elaborados bajo esta normativa en los que se identificaron las cuencas donde estaban localizadas las estaciones hidrometeorológicas.

Para la Zonificación de Unidades Hidrográficas se inició asignando un código numérico de cuatro dígitos a cada cuenca de tal forma que tuviera relación con la estación hidrológica o meteorológica. Así se estructuró la Red Hidrográfica de Colombia, con una versión levantada sobre cartografía IGAC en formatos shapes y MDX a escala 1:500000, delimitando las mismas cinco Áreas Hidrográficas iniciales pero en el siguiente orden: 1. Caribe, 2. Pacífico, 3. Magdalena - Cauca, 4. Orinoco, 5. Amazonas. Posteriormente se delimitaron las zonas y subzonas.

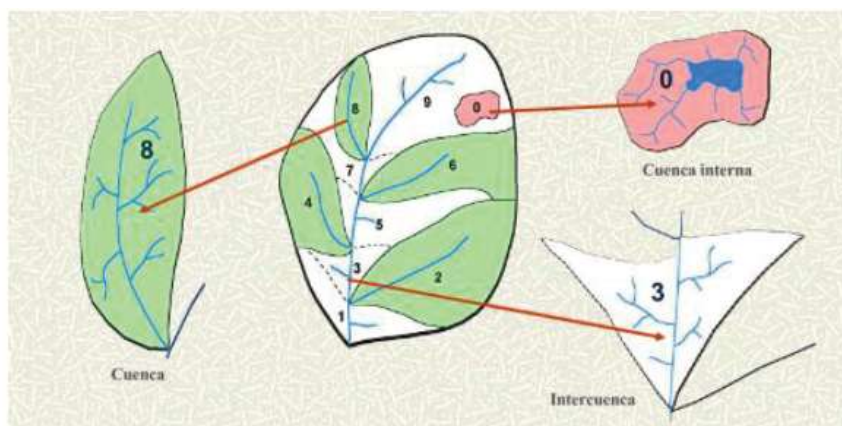
La metodología se ajustó a la desarrollada por Otto Pfafstetter en Brasil:

*“El método de Otto Pfafstetter se inicia por la determinación del curso de agua principal de la cuenca a codificarse. Esa determinación consiste en partir de la*



*desembocadura de la cuenca y decidir, a cada confluencia, cual el tramo de mayor área de contribución. Si se repite ese proceso a cada confluencia, se va agregando tramos al curso de agua principal hasta el tramo más a río arriba. El río destacado en rojo en la Figura 2 es el resultado de esa primera etapa.” (Agencia Nacional del Agua - ANA, 1989)*

Esta metodología se adoptó por el Servicio Geológico de Estados Unidos y hoy es conocido como el Sistema de Codificación Estándar Internacional que sigue la estructura:



Fuente: Delimitación y codificación de cuencas hidrográficas (INRENA, 2005).

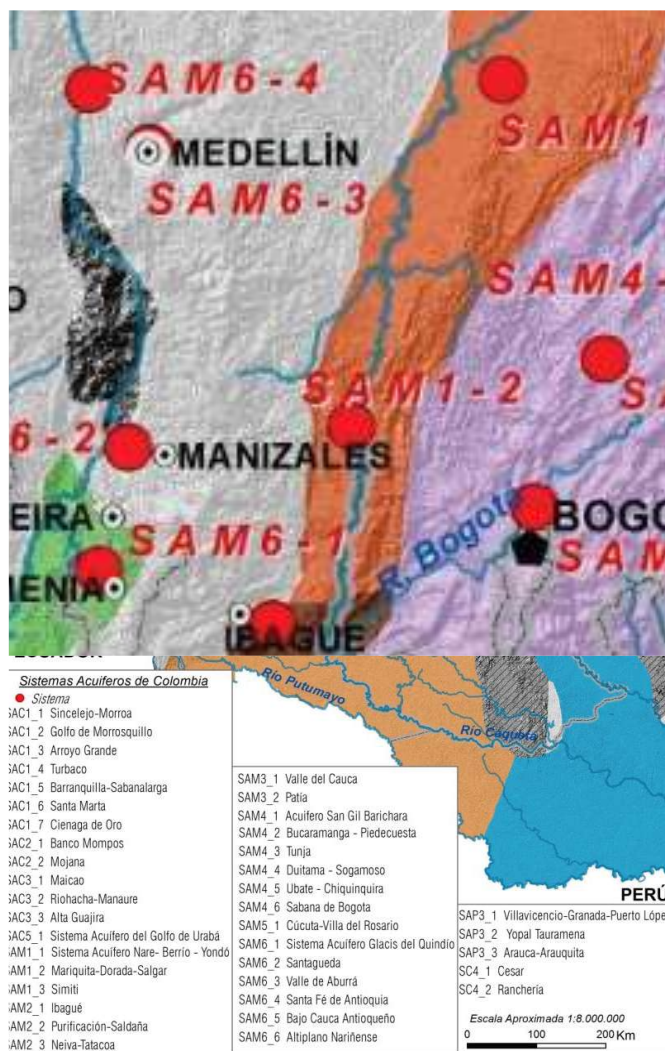
Fuente: (IDEAM, Noviembre, 2013)

El concepto de cuenca se entiende como un área que no recibe drenaje de otras áreas, la cuenca interna es el área que tributa al drenaje principal y la intercuenca como el área que recibe aportes de otras cuencas. Es con fundamento en estos conceptos que se codifican las unidades hasta conformar un código de 10 dígitos con que se almacena en el Sistema de Información del Recurso Hídrico. –SIRH -



Fuente: (IDEAM, Noviembre, 2013)

#### 5.7.4. Ubicación del área de interés



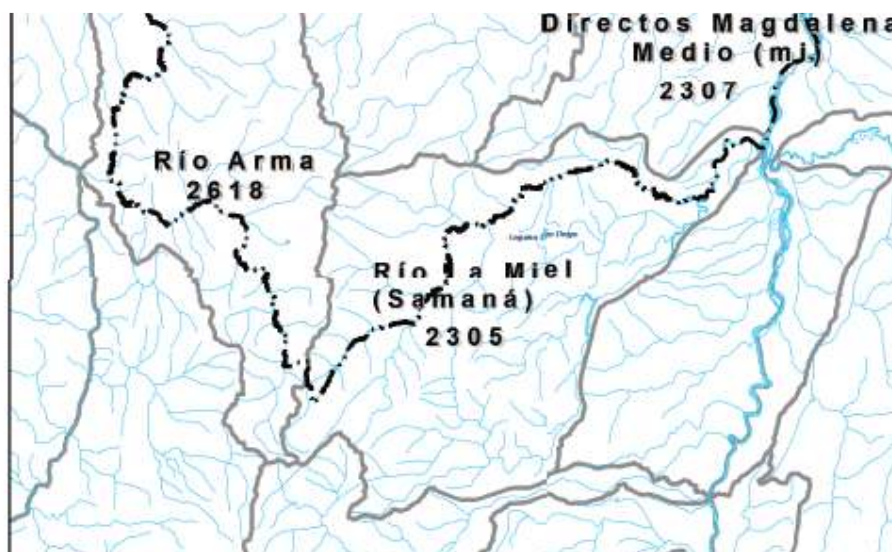
Fuente: (IDEAM, Noviembre, 2013)

Se trata de un territorio codificado dentro del Área Hidrográfica Magdalena – Cauca con la nomenclatura AM1-2 Mariquita – Dorada – Salgar de acuerdo con los criterios del Decreto 1640

de agosto 16 de 2012, por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos,.

En este Decreto se definió con carácter normativo lo que se precisa como Acuífero, al determinar que éste es la *unidad de roca o sedimento*, capaz de almacenar y transmitir agua, entendida como el sistema que involucra las zonas de recarga, tránsito y de descarga, así como sus interacciones con otras unidades similares, las aguas superficiales y marinas.

Respecto de su caracterización el Estudio Nacional del Agua 2010 lo identificó como una zona con Acuíferos libres a semiconfinados en unidades recientes y del Terciario Superior. Libres a confinados en unidades más antiguas. Las formaciones geológicas corresponden a Depósitos aluviales recientes y de terraza, sedimentos detríticos poco consolidados (areniscas, conglomerados) de la Formación Mesa y el Grupo Real. (Rodríguez, Vargas, Jaramillo, Piñeros, & Cañas, 2011)



Área de jurisdicción de CORNARE

Escala 1:500.000- Fuente: (IDEAM, Noviembre, 2013)

En cuanto a la jurisdicción de autoridad ambiental para el ejercicio de las funciones de monitoreo, entendida como Unidad Hidrográfica a nivel de Subzona, esta fue asignada a CORNARE, (Corporación Autónoma Regional del Río Nare, aunque por jurisdicción departamental la competencia para efectos de la planificación del Río La Miel le corresponde a Corpocaldas.

### **5.8. Cuenca Hidrográfica**

El marco normativo vigente (Decreto 1640 de 2012) también define la cuenca hidrográfica como *“el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar”*. (por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, 2012)

En la cuenca se expresa el ciclo hidrológico como un sistema natural interconectado, donde inciden elementos biofísicos, socioeconómicos y culturales. A partir del agua lluvia que ingresa y escurre por las laderas, puede ser interceptada por las depresiones del terreno, las fracciones que se evaporan y las que se infiltran, quedando un remanente que se deposita en los drenajes. De esta forma se registra la escorrentía y su función que alimenta los cuerpos de agua.

Además de la escorrentía superficial, también hay flujos subterráneos entre los cuales la infiltración o percolación alimenta depósitos de aguas subterráneas y mantos acuíferos.

Toda la malla así formada confluye a un río principal que entrega a un Área de mayor jerarquía, e inicia en una unidad mínima situada en la cota más alta de la cuenca, llamada cabecera.



## 5.9. Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos

Los instrumentos para la Planificación, Ordenación y Manejo del Recurso Hídrico tiene cinco componentes:

- 1) Los planes estratégicos de las cinco áreas hidrográficas.
- 2) El programa nacional de monitoreo del recurso hídrico en las zonas hidrográficas.
- 3) Los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA) en sub-zonas hidrográficas o de nivel subsiguiente.
- 4) Los planes de manejo ambiental de micro-cuencas en el nivel inferior al subsiguiente.
- 5) Los planes de manejo ambiental de acuíferos.

En el caso de los Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos, se exigen unas escalas de trabajo, el propósito y las instancias de coordinación.

### MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

NIVEL	No.	ESCALA	INSTRUMENTO PLANIFICACIÓN	OBJETO	PARTICIPANTES	INSTANCIA DE COORDINACIÓN	
4	Acuíferos	ND	1:25.000	Plan de manejo ambiental	Medidas de manejo y protección ambiental de los acuíferos priorizados	ACC, Alcaldías, gremios, asociaciones de usuarios locales	Mesa de trabajo
	Microcuencas	ND	1:10.000	Planes de Manejo Ambiental	Medidas de manejo y protección de las microcuencas prioritarias	ACC, Alcaldías, gremios, asociaciones de usuarios locales	Mesas de trabajo

FIGURA 1. ESTRUCTURA PARA LA ORDENACIÓN Y MANEJO DE LAS CUENCAS HIDROGRÁFICAS Y ACUÍFEROS

Tabla 3 Estructura para la ordenación y manejo de las CHA Fuente: (MINAMBIENTE, 2014)

En el caso de los acuíferos, la norma dispuso como instrumento de planificación elaborar Planes de Manejo Ambiental, a escala 1:25000, con el propósito de adoptar medidas de manejo y protección ambiental de acuíferos, donde participan la Alcaldía, Actores Ciudadanos Clave, las asociaciones de usuarios de servicios públicos, y la instancia de coordinación son las mesas de trabajo.

Respecto de la competencia para expedir el Plan de Manejo Ambiental, en el caso de aquellos acuíferos que no estén dentro de un plan de ordenación y manejo de una Cuenca Hidrográfica, su elaboración le corresponde a la autoridad ambiental con competencia en el territorio. El procedimiento para expedir el PMA de un acuífero se debe dar cuando se presente una situación relacionada con la oferta, demanda, calidad del agua, riesgo y gobernabilidad así:

- Agotamiento o contaminación del agua subterránea.
- El agua subterránea es la única y/o principal fuente de abastecimiento para consumo humano.
- Las características hidrogeológicas del acuífero lo hace estratégico para el desarrollo socio-económico de la región.
- Cuando existan conflictos por el uso del agua.
- Cuando se requiera que el acuífero sea la fuente alterna por desabastecimiento de agua superficial.

Entre los pasos necesarios para elaborar el Plan de Manejo Ambiental de un Acuífero se requiere la modelación hidrogeológica. Esto es, una representación descriptiva y gráfica del sistema acuífero donde se incorpore la interpretación de condiciones hidrogeológicas y la interrelación con sistemas asociados, reduciendo el acuífero a un modelo simplificado de su

realidad, que se debe ajustar en el tiempo a medida que varíen condiciones de climatología e hidrología. (*Bredehoeft, 2002*)

En el modelo hidrogeológico conceptual de un acuífero, se requiere realizar un inventario de puntos de agua subterránea, hidrología, hidroquímica, hidráulica subterránea, entre otros aspectos que se deben contemplar, con el fin de identificar las zonas de recarga, tránsito y descarga facilitando identificar las medidas para su aprovechamiento y protección. (*Bredehoeft, The conceptualization model problem—surprise, March 2005, Volume 13, )*

Para estimar las reservas de agua subterránea del país, se caracterizó y cuantificó la oferta y el uso de aguas subterráneas para lo cual se dividió el territorio en Unidades de Análisis mediante la delimitación de Provincias Hidrogeológicas a escala nacional de 1:10000000 y 1:500000, basadas en características tectónicas y estratigráficas. (*Rodríguez, Vargas, Jaramillo, Piñeros, & Cañas, 2011*)

## **5.10. Energía Eléctrica**

Es un fenómeno de la física - Química mediante el cual se logra producir luz a través de la estimulación de átomos metálicos conductores que generan cargas eléctricas. (TWENERGY, 1 febrero 2012). En ese contexto resultan numerosas las fuentes aptas para proveer energía tales como la radiación solar, el vapor de agua, la biomasa vegetal y fósil, las mareas, el viento, vibración de cristales o piezoeléctrica, las caídas de agua. En función de rendimiento, se ha dado mayor utilización a la nuclear y la hidroeléctrica, mientras se investiga en otras alternativas para generarla en forma limpia, eliminando el más mínimo impacto al entorno.

Colombia provee más del 60% de energía con fuentes generadas a través de centrales hidroeléctricas, debido a las pendientes topográficas y la oferta hidrológica. Se encuentra reglada por la Ley 142 de 1994 y la Ley 143 del mismo año.

Con fundamento en esta normatividad se constituyó el Sistema Nacional de Energía y un sector de servicios específico en la Electricidad que separó en unidades de negocio la generación, la transmisión, la distribución y la comercialización.

La generación hidroeléctrica contempla una infraestructura donde se aprovecha el recurso hídrico, aspecto que hoy es objeto de monitoreo, ya que los embalses dentro del sistema hidrológico implica modificaciones en la red fluvial y en los ecosistemas asociados y es necesario valorar la magnitud de los cambios que se dan en las cuencas.

### **5.11. ENOS (ENSO). El Niño Oscilación del Sur**

Las primeras evidencias de un fenómeno climático se dieron en el año 1891 y sobre ellas alertó el doctor Luis Carranza en un artículo que publicó en el boletín de la Sociedad Geográfica de Lima, donde lo describió como una *“contracorriente de norte a sur entre los puertos peruanos de Paita y Pacasmayo”*. (Carranza, 1891), y que citó Alfonso Pezet en 1895 durante el VI Congreso Geográfico Internacional en Londres. *"Como esta contracorriente se ha observado en distintas ocasiones y su aparición a lo largo de la costa peruana ha coincidido con lluvias en latitudes donde rara vez o nunca llueve en abundancia, deseo, en la presente ocasión, llamar la atención de los distinguidos geógrafos aquí reunidos sobre este fenómeno que ejerce, sin duda, una gran influencia en las condiciones climáticas de esa parte del mundo"*

Fueron los marineros de Paita navegantes del litoral pacífico quienes la denominaron la corriente de “*El Niño Jesús*” porque se presentaba después de Navidad. Pasados setenta años, nada adicional se conocía hasta que en 1969 un profesor de la Universidad de California Jacob Bjerknes definió un modelo físico del fenómeno y tres años después Rasmusson y Carpenter estudian los patrones atmosféricos del Pacífico, logrando verificar variaciones cíclicas de presión atmosférica entre la isla de Tahití y Darwin en Australia. Para muchos investigadores El Niño existe por lo menos hace unos 40.000 años.

ENSO es un sistema oceánico – atmosférico modulador del clima, de ocurrencia en el Océano Pacífico ecuatorial donde la temperatura de la superficie marina TSM corresponden con el evento, mientras en el océano Pacífico Central la TSM registra valores cercanos al promedio y el Océano Pacífico en las costas del sur de México registra TSM por encima de los 28.5°C. En concreto, las temperaturas de la superficie oceánica varían en forma sensible a lo largo de la misma costa, siguiendo un patrón que es objeto de monitoreo.

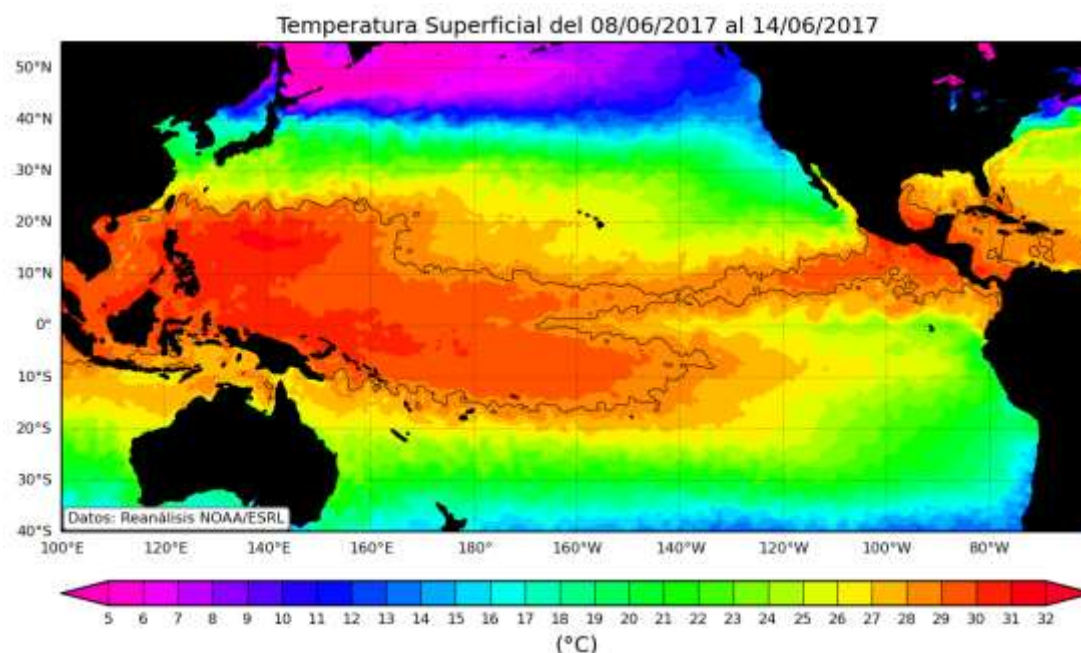
En su fase fría el ENSO es conocido como La Niña; se presenta en las costas de Suramérica y se caracteriza por la intensificación de los vientos alisios, la activación de la corriente ecuatorial con intensificación de la corriente fría de Humboldt lo que magnifica la surgencia emergiendo la termoclina que aumenta la concentración de nutrientes en la cuenca del océano Pacífico suramericano. (*IDEAM, Mayo, 2015*)

Mientras en las costas del océano Pacífico en Suramérica se registran temperaturas frías, las cálidas se establecen en el continente asiático y Oceanía, incrementando el sistema de baja presión que favorece la circulación zonal de Walker y las precipitaciones en el territorio colombiano. (*IDEAM, Mayo, 2015*)

Entre los diferentes indicadores para estimar la fase actual y estado de desarrollo del ENSO se encuentran:

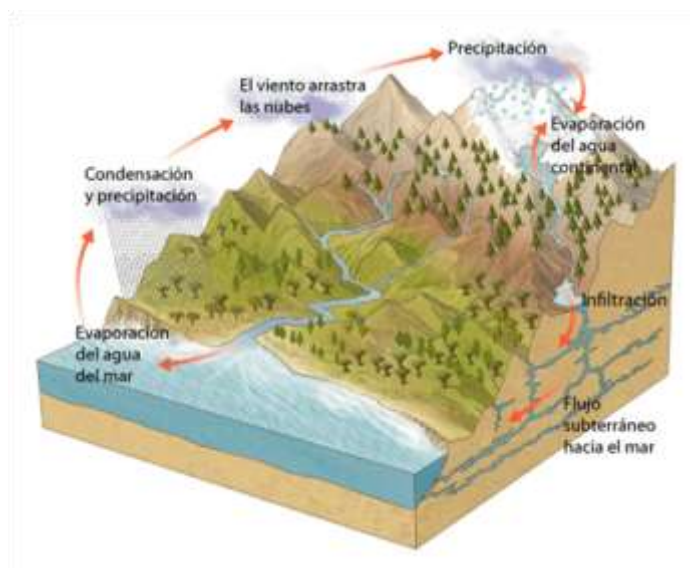
El índice multivariado, MEI (Multivariate Enso Index) muestra el comportamiento de la variabilidad interanual de las variables atmosféricas en el territorio colombiano. Los valores positivos del MEI corresponden a la fase cálida de ENSO, (El Niño), mientras que los valores negativos de MEI representan la fase fría de ENSO (La Niña). (IDEAM, Mayo, 2015)

El índice oceánico, ONI (Oceanic Niño Index), se basa en la desviación de la temperatura superficial del mar (SST) con respecto al promedio en el centro del Pacífico tropical. Esta magnitud se utiliza para el monitoreo, evaluación y pronóstico de un evento ENSO y se calcula como la media móvil durante tres meses consecutivos de las anomalías de la SST en la región centro del Pacífico. (IDEAM, Mayo, 2015)



Fuente: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/enos> (Servicio Meteorológico Nacional, 2017)

Un evento El Niño se caracteriza por ONI positivos mayores o iguales a  $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El evento La Niña se caracteriza por ONI negativos menores o iguales a  $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para ser catalogado como un periodo Niño o Niña es necesario que el ONI alcance valores superiores a estos rangos durante al menos cinco periodos consecutivos de tres meses. (IDEAM, Mayo, 2015)



Fuente: (Castro, 2013)

## 5.12. Variabilidad climática

Los fenómenos como los vientos, nubes, lluvias, tormentas que se presentan en un momento dado es lo que se conoce como tiempo atmosférico. Como clima se conoce aquellas condiciones que predominan durante un período de tiempo, como una semana, un mes, un año o varios años). Así puede hablarse de tiempo lluvioso si solo llueve unas horas, y clima lluvioso si se da en una zona donde las lluvias son frecuentes. El clima de La Tierra lo controla la energía del sol que llega a la tierra por la atmósfera y calienta la superficie de los espejos de agua en el océano, lagos y el suelo. Los vientos y las corrientes marinas distribuyen el calor y la humedad. El clima depende de

donde se encuentre una zona o lugar en el planeta respecto del Ecuador, o su altura respecto del nivel del mar. (CAR CUNDINAMARCA, 2015)

Se define como fluctuaciones del clima que se presentan durante periodos que pueden durar meses, años o decenios. Es normal que se registren valores por encima o por debajo de la normal climatológica en un promedio de treinta años. (Pabón, 2011).

Esta diferencia es perturbada cuando cada una de esas fluctuaciones en sus respectivas escalas de tiempo (intraestacional, interanual, interdecadal y secular), interactúan entre sí de manera que intensifican o debilitan los parámetros meteorológicos. La diferencia entre el valor registrado de la variable y su promedio se conoce como anomalía (Pabón, 2011). El estudio se orienta a identificar la variabilidad hidroclimática a escala Interanual.

Los índices seleccionados para este análisis corresponden a los que pueden tener influencia en la variabilidad hidroclimática en las diversas regiones de Colombia. Se pueden mencionar relaciones con fenómenos como el ENSO (El Niño/Southern Oscillation), determinado por sus dos fases (NOAA, 2009): El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría), dada la importancia de los efectos de este fenómeno en los eventos hidrológicos extremos (sequías e inundaciones) y en la oferta hídrica del país.



## **6. Marco Teórico**

### **6.1. Exploración, localización y caracterización de acuíferos**

La actividad exploratoria para el hallazgo de aguas subterráneas concentra toda clase de estudios y acciones focalizadas en la ubicación, dimensionamiento y características de aquellas zonas donde se favorece la acumulación de agua subterránea, siguiendo diversas metodologías desarrolladas. (Bellino, 2012). En Colombia está disponible desde el año 2004 la metodología y documentos técnicos de INGEOMINAS. En todo caso, el nivel de evaluación y alcance dependen de la escala de trabajo donde deben cumplirse tres etapas:

#### **6.1.1. Etapa 1.**

Estudios de reconocimiento. Se desarrolla en forma preliminar a escalas iguales o menores de 1:500000 sobre un área extensa, con el fin de identificar unidades hidrogeológicas de interés, caracterizar y compilar las condiciones generales del territorio a partir de información secundaria. (INGEOMINAS, 2004)

#### **6.1.2. Etapa 2.**

Estudios de exploración y evaluación regional. Se adelanta a escalas de 1:250000 y de 1:50000. El objetivo es caracterizar y evaluar el origen, distribución y régimen hidrológico subterráneo en las formaciones hidrogeológicas. (INGEOMINAS, 2004). Con estos resultados se identifican, delimitan y caracterizan las estructuras hidrogeológicas, se pronostica una estimación de los recursos y reservas de agua subterránea, produciendo información y cartografía útil para elaborar los Planes de Manejo Ambiental de los Acuíferos.

En esta etapa se enfatiza en la “*litología, texturas, cambios de superficie, porosidad, ambientes de deposición, estructuras tectónicas y geomorfológicas, así como composición mineralógica de los sedimentos y rocas. Se deben utilizar herramientas y disciplinas, tales como interpretación de fotografías aéreas, imágenes de radar y satélite, estratigrafía, sedimentología, vulcanología y geología estructural, principalmente*”. (INGEOMINAS, 2004)

#### **6.1.2.1. Exploración geofísica:**

En la exploración geofísica de aguas subterráneas se busca precisar la presencia y la geometría de las zonas acuíferas, su nivel de profundidad, espesor de la zona no saturada, porosidad de las rocas, los ambientes de deposición y la contribución del acuífero, el nivel de mineralización, presencia de fracturas con su ubicación, identificación de reservorios geotérmico, entre otros datos, con los cuales se espera obtener un modelo conceptual que debe validarse con perforaciones exploratorias utilizando metodologías convencionales.

Entre esas metodologías INGEOMINAS recomienda métodos como la resistividad, la gravimetría, la sísmica, la magnetometría, el electromagnetismo, los registros geofísicos de pozos, la resonancia magnética de protones o nuclear.

#### **6.1.2.2. Reconocimiento Hidrogeológico.**

La fase principal y esencial en la exploración de aguas subterráneas es el Reconocimiento Hidrogeológico. Este es un procedimiento que consta de dos etapas:

- ✓ Elaboración del inventario de puntos de agua con datos tomados en campo con el fin de ubicar aljibes, pozos, humedales, manantiales.

- ✓ Elaboración de la red de monitoreo, con la que se confirma el modelo conceptual.

### 6.1.2.3. Perforaciones Exploratorias.

La ubicación y diseño de las perforaciones depende de la información de campo en aspectos hidráulicos y químicos.

### 6.1.2.4. Evaluación hidrodinámica,

Es el estudio del movimiento del agua entre las rocas y los sedimentos, tomada desde las zonas de recarga hasta los puntos de descarga, trazando la dirección del flujo subterráneo.

En este tramo se toman en cuenta: La presión piezométrica<sup>3</sup>, el gradiente hidráulico<sup>4</sup> y otros parámetros como conductividad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento.

### 6.1.2.5. Caracterización hidro-geoquímica,

Que pretende averiguar sobre el origen de las aguas, procesos y composición de las aguas almacenadas, para determinar su calidad y posibles usos, aplicando análisis físicos, químicos e isotópicos.

En cuanto al modelo conceptual se obtienen datos relacionados con:

---

<sup>3</sup> La presión piezométrica es la relación entre la presión estática y la presión dinámica de un líquido, entendido que la presión estática corresponde al valor de la presión del líquido en reposo y la dinámica es la presión del mismo líquido cuando se encuentra en movimiento, bajo las restricciones de la superficie que lo contiene y las implicaciones de éste en la pérdida progresiva de energía. En este caso cobra importancia conceptos como la altura piezométrica.

<sup>4</sup> El gradiente hidráulico es la causa del movimiento del agua, que se explica en que el líquido se mueve desde un punto A hacia un punto B, porque la altura piezométrica en A es mayor que en B de tal manera que entre A y B se presenta una pérdida o variación de carga: Como  $h_A > h_B$  entonces la pérdida de carga se presenta por una variación en la altura que se expresa como:  $\Delta h = h_A - h_B$

- ✓ Identificación de las zonas de recarga y descarga.
- ✓ Dirección del flujo de las aguas.
- ✓ Origen y mezclas e interconexiones de diversos orígenes.
- ✓ Tiempo de residencia.
- ✓ Ocurrencia de aguas mineralizadas o termales.

#### **6.1.2.6. La evaluación hidrológica**

Parte del concepto general que las aguas lluvias, las superficiales y las subterráneas están en constante relación y pertenecen al mismo ciclo hidrológico y que la principal fuente que provee las aguas subterráneas son las aguas percoladas procedentes de las precipitaciones.

La evaluación hidrológica provee al modelo conceptual, datos como:

- ✓ Posibles fuentes y zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas.
- ✓ Balance hídrico superficial que dará el índice de disponibilidad de agua para recarga.

#### **6.1.2.7. Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación.**

Ella está ligada a las características litológicas de la zona no saturada, el tipo de acuífero; en acuíferos libres depende de la profundidad del nivel del agua y en los acuíferos confinados, se limita a la profundidad del techo del depósito.

La vulnerabilidad debe revisarse con frecuencia pues algunas variables son temporales.

#### **6.1.2.8. Modelo hidrogeológico conceptual**

Concentra y representa el conocimiento hidrogeológico del mediante un esquema lógico cualitativo y cuantitativo. El modelo dice cómo funcionan y se comportan los acuíferos permitiendo predecir su oferta y prevenir posibles impactos ambientales al sistema dentro de la gestión integral del recurso hídrico.

#### **6.1.2.9. Modelo matemático**

Es la representación numérica de las condiciones hidrogeológicas que permite evaluar el potencial especialmente cuando otros métodos de cálculo no reportan información cuantitativa confiable.

#### **6.1.3. Etapa 3.**

Estudios de exploración a detalle en escala igual o mayor de 1:25000 para ser utilizados en la localización y diseño de obras de captación o la solución de problemas específicos que se consideran problemas de orden local como remediación de contaminación, construcción de obras civiles, entre otras.

### **6.2. Aproximación al estudio de los Acuíferos**

En términos generales, un acuífero puede describirse como una capa del subsuelo de naturaleza rocosa o sedimentaria donde se dan unas condiciones naturales para que el agua se almacene y circule, siendo renovada mediante procesos de recarga activados desde la superficie a través de la percolación o infiltración de aguas de escorrentía, y se mueva horizontalmente alimentando otros depósitos o corrientes.

El tiempo que permanece almacenada el agua en un depósito subterráneo se le conoce como *tiempo de residencia*, el cual se define como el período necesario para que el líquido se renueve por completo al ritmo de su tasa de movimiento, limitado por características de permeabilidad propias de las rocas, o la impermeabilidad de formaciones geológicas superiores como los acuitardos, o por razones climáticas bajo las cuales sobrevenga sequía o aridez. (Bellino, 2012)

Los acuíferos fósiles son bolsones que se formaron en épocas geológicas pasadas y que perdieron capacidad de recarga por motivos como variaciones climáticas.

### **6.2.1. Infiltración y recarga**

El agua proveniente del descongelamiento glaciario, el rocío y las lluvias en contacto con el suelo, se distribuye en tres fracciones (Rodríguez F. R., 3 diciembre 2009): La escorrentía o escurrimiento se desplaza por la superficie formando hilos y arroyos. Parte de ésta vuelve a la atmósfera mediante la evaporación y allí se encuentra con agua en estado gaseoso procedente de la transpiración de los organismos. Una tercera fracción se infiltra en el suelo, en una proporción que depende de las siguientes variables:

- Características de permeabilidad del suelo, porosidad, diaclasamiento y mineralogía.
- Gradiente topográfica
- Densidad y tipología de cobertura vegetal
- Sistemas radicales.

## 6.2.2. Determinación de la recarga

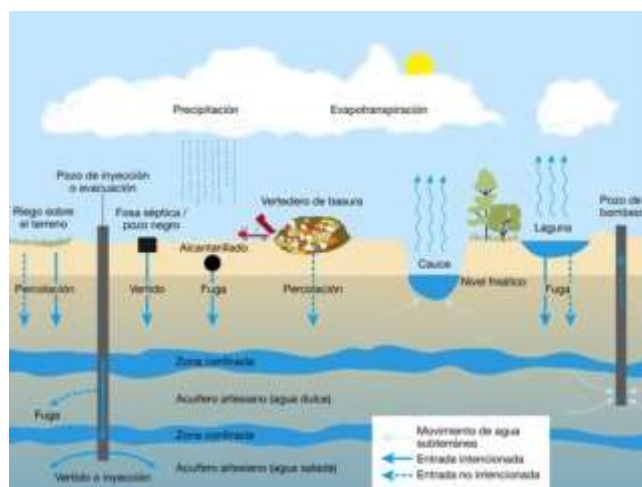
Los métodos para determinar la recarga de acuíferos se clasifican en cinco grupos (Otálvaro & Ariza, 2003) así:

### 6.2.2.1. Medidas directas.

La recarga se mide con lisímetros. Éste es un bloque de suelo con dispositivos que miden el flujo que drena hasta el acuífero.

### 6.2.2.2. Balance hídrico.

Es un ejercicio mediante el cual se determinan los flujos de entrada y salida de un sistema, donde la recarga al acuífero es la diferencia entre las dos variables.



Fuente (Ferraz)

En este grupo se encuentran los balances de humedad del suelo, balances de agua en canales, las fluctuaciones de nivel freático, y el método que iguala la descarga a la recarga.

Para aplicar este método se requiere información de registros históricos de las variables precipitación, caudales y evapotranspiración. Esta información hidrológica se somete a análisis estadísticos de datos buscando identificar desviaciones, patrones o tendencias en la media entre otros datos.

### **6.2.2.3. Trazadores.**

El uso principal de éstos consiste en determinar fuentes y zonas de recarga así como zonas de descarga utilizando un balance de masa del trazador.

### **6.2.2.4. Aproximaciones de Darcy.**

La aplicación de este método requiere que se hallen valores de cabeza hidráulica aplicando ecuaciones de flujo de Richards y Boussinesq (*Carlos Chávez, 2011*) para determinar la velocidad de filtración (*Ortuño, 2007*).

Si se asumen condiciones estables, la recarga se determina directamente de la ecuación de Darcy según la cual la velocidad de flujo es proporcional al gradiente hidráulico.

$$V = Ki = K * \frac{\Delta h}{L}$$

### **6.2.2.5. Empíricos.**

Es el desarrollo de ecuaciones de prueba fundadas en experiencia y observación, que relacionan la recarga con alguna variable como la precipitación, incluye la recarga en áreas urbanas.



Algunas de esas ecuaciones empíricas elaboradas para estimar la recarga de acuíferos por precipitación, utilizadas en lugares donde se carece de información suficiente sobre variables hidrológicas son:

**Ecuación de Cheeturvedi:**

$$r = 1.35 (p - 14)^{0,5}$$

Donde: r es la recarga medida en pulgadas por año y p es la precipitación medida en pulgadas/año.

**Ecuación de Sehgal:**

$$r = 2.5 (p - 16)^{0,5}$$

Dónde: r es la recarga medida en pulgadas por año y p es la precipitación medida en pulgadas/año

**Ecuación de Turc:**

$$r = p \left[ 1 - \left\{ 0,9 + \frac{p^2}{L^2} \right\}^{-0,5} \right]$$

$$L = 300 + 25T + 0,05T^2$$

Dónde: r es la recarga medida en milímetros (mm) por año; p es la precipitación medida en mm/año y T es la temperatura media anual medida en °C

### 6.2.3. Conceptos de caudal y bombeo

**La transmisividad** en los acuíferos es el volumen de agua que por unidad de tiempo pasa a través de una sección vertical de ancho unitario y altura  $b$ , siendo ésta la altura de la zona saturada.

**El coeficiente de almacenamiento** corresponde al volumen de agua que libera un prisma del acuífero de sección unitaria con una altura igual a la parte saturada del mismo cuando se produce el cambio en una unidad del nivel piezométrico.

**La capacidad específica** de una captación se define como la relación entre el caudal bombeado y el abatimiento o descenso del nivel en el pozo. Las pruebas de bombeo se utilizan para régimen transitorio y se interpretan con métodos Theis, Jacob o Hantush. En otros casos como los aljibes se realizan pruebas con Slug test. (*Quiroga, Julio, 2016*)

Las pruebas de bombeo para caudal variable o escalonado se utilizan para determinar la curva característica del pozo. (*Quiroga, Julio, 2016*)

### 6.2.4. Morfología de acuíferos y tipos de recarga

Un acuífero se recarga por medios naturales a partir de la precipitación, a partir de aguas de la superficie como ríos, lagos y humedales, o por transferencia de otras unidades hidrogeológicas. En otros casos puede darse recarga por medios artificiales debido al desarrollo de actividades antrópicas como el riego o fuga de redes, embalses o depósitos y por la recarga urbana. (*HISPAGUA, 16 junio de 2017*)

En la recarga de acuíferos se define las zonas del perfil; en la zona húmeda se distinguen dos áreas:

Una *zona saturada* que se delimita en su parte superior por la napa freática que llena totalmente los vacíos de los materiales del suelo estando expuesta a la presión atmosférica. La otra zona se conoce como *no saturada* que se localiza entre la superficie freática y la superficie del suelo. (Otálvaro & Ariza, 2003)

En la zona no saturada se diferencian tres subzonas: Sub-zona1: La expuesta a evaporación que se ubica entre la superficie del terreno y los extremos de las raíces de las plantas. Sub-zona 2 o Intermedia es la que sigue inmediatamente después de la sub-zona de evaporación. Y la Sub-zona 3, capilar que es la región de transición a la zona saturada. (Otálvaro & Ariza, 2003)

Para otros autores la zona no saturada se compone de dos subzonas: La radicular o suelo edáfico y una segunda capa denominada zona vadosa donde es posible que existan acuíferos colgados que den lugar a flujos horizontales, y su flujo descendente cuando aflora se estima que iguala a su recarga.

#### **6.2.5. Tipos de acuíferos.**

Los acuíferos pueden clasificarse de acuerdo con el tipo de terrenos, la presión, la ubicación geográfica, su profundidad y tipo o característica de sus aguas.

Atendiendo a la tipología de los materiales los teóricos los clasifican en porosos y fisurados. De acuerdo con la presión, se clasifican en libres y confinados (Cautivos o artesianos). Y según la geografía se tiene que los acuíferos pueden ser costeros y continentales.

De acuerdo con la capacidad de almacenar y transmitir agua, los acuíferos pueden ser:

**Acuitardos:** Son formaciones semipermeables que transmiten el agua muy lentamente.

**Acuicludos:** Son estratos o formaciones que a pesar de ser porosas son impermeables por lo que pueden almacenar agua pero no la transmiten a través de sus paredes.

**Acuifugos:** Se trata de rocas con porosidad nula sin capacidad de almacenar y transmitir agua.

**Acuíferos Libres:** El nivel superior de saturación se encuentra a la presión atmosférica. A su superficie piezométrica se le denomina superficie freática. De ahí que se les denomine acuíferos freáticos cuya zona vadosa se encuentra en la parte superior. (*Infante, 2014*)

**Acuíferos confinados o cautivos** se definen como formaciones geológicas permeables, saturadas completamente, que se encuentran encerradas entre capas impermeables, que a su vez pueden coincidir entre acuifugos y acuicludos. El agua en su interior está sometida a presión que supera la atmosférica.

**Acuíferos Semiconfinados,** son aquellos donde el estrato confinante es un acuitardo, por ello pueden recibir recarga a goteo que ingresa a través de las capas semipermeables que lo encierra.

**Acuíferos Colgados** expresión que se refiere a la acumulación de agua subterránea con escasa continuidad lateral, que se ubican por encima del nivel freático principal. Se presentan con frecuencia en formaciones detríticas con materiales poco permeables como limos y arcillas insertas en material granular más permeable. Estos acuíferos alimentan pequeños manantiales que registran notorias variaciones estacionales en su caudal. (*Infante, 2014*)

#### **6.2.6. Enfoque por ecosistemas como fundamento de planificación**

Esta estrategia establecida por la Comunidad de Naciones para la gestión integrada de tierra, agua y recursos biológicos, busca promover la conservación y uso sostenible de los ecosistemas, logrando el equilibrio de éstos, su conservación, uso sostenible y distribución justa y equitativa

de beneficios por el uso de los recursos genéticos. (*Naciones Unidas Cumbre de la Tierra, Junio, 1992*)

Fundado en la aplicación del método científico, el enfoque por ecosistemas atiende de manera prioritaria a los niveles de organización biológica, toma los procesos esenciales que se cumplen en las zonas de vida, sus funciones e interacciones en su medio donde reconoce al ser humano como uno de sus componentes. (*Secretaría del Convenio sobre Diversidad Biológica, noviembre 24 de 2008*)

El Convenio sobre Diversidad Biológica caracteriza el ecosistema como un complejo dinámico entre comunidades vegetales, animales, microorganismos en su medio orgánico e inorgánico, actuando como una unidad funcional, sin involucrar un referente de medición en unidades o escala para su interpretación, ni corresponde con los conceptos de hábitat, bioma o zona ecológica. (*Ángela Andrade, 2011*)

#### **6.2.7. Principios del enfoque por ecosistemas.**

Según el texto tomado de la Decisión V/6 de la Convención sobre Diversidad Biológica (*UNEP/CBD/COP/6/20 Anexo I, Abril de 2002*), el enfoque se sustenta en doce principios que complementan los principios fundamentales que se enuncian a continuación: (*Ángela Andrade, 2011*)

**Principio 1:** La elección de los objetivos de la gestión de los recursos de tierras, hídricos y vivos debe quedar en manos de la sociedad.

**Principio 2:** La gestión debe estar descentralizada al nivel apropiado más bajo.

**Principio 3:** Los administradores de ecosistemas deben tener en cuenta los efectos (reales o posibles) de sus actividades en los ecosistemas adyacentes y en otros ecosistemas.

**Principio 4:** Dados los posibles beneficios derivados de su gestión, es necesario comprender y gestionar los ecosistemas en un contexto económico de manera a:

a) Disminuir las distorsiones del mercado que repercuten negativamente en la diversidad biológica;

b) Orientar los incentivos para promover la conservación y la utilización sostenible de la diversidad biológica;

c) Realizar valoraciones económicas de los servicios ecosistémicos, promoviendo la incorporación de los costos ambientales así como la distribución equitativa de los beneficios.

**Principio 5:** A los fines de mantener los servicios de los ecosistemas, la conservación de la estructura y el funcionamiento de éstos debería ser un objetivo prioritario del enfoque por ecosistemas.

**Principio 6:** Los ecosistemas se deben gestionar dentro de los límites de su funcionamiento.

**Principio 7:** El enfoque ecosistémico debe aplicarse a las escalas espaciales y temporales apropiadas

**Principio 8:** Habida cuenta de las diversas escalas temporales y los efectos retardados que caracterizan a los procesos de los ecosistemas, se deberían establecer objetivos a largo plazo en la gestión de los ecosistemas.

**Principio 9:** En la gestión debe reconocerse que el cambio es inevitable.

**Principio 10:** En el enfoque ecosistémico se debe procurar el equilibrio apropiado entre la conservación y la utilización de la diversidad biológica, y su integración

**Principio 11:** En el enfoque ecosistémico deberían tenerse en cuenta todas las formas de información pertinente, incluidos los conocimientos, las innovaciones y las prácticas de las comunidades científicas, indígenas y locales.

**Principio 12:** En el enfoque ecosistémico deben intervenir todos los sectores de la sociedad y las disciplinas científicas pertinentes.

### **6.3. Centrales Hidroeléctricas**

También conocidas como plantas hidroeléctricas cuyo objetivo es el aprovechamiento de la energía hidráulica para producir energía eléctrica. (*Velásquez, 19 noviembre 2002*). Si el agua se concentra en embalse, inicialmente se tiene energía potencial que al ser sometida al gradiente de altura por acción de la gravedad adquiere energía cinética. La energía que desarrolla el agua al caer se conoce como energía hidráulica, cuya magnitud la da su masa y velocidad, que aplicada a las turbinas generan su empuje transformando la energía hidráulica en energía mecánica.

Esa energía se propaga a los generadores acoplados en las turbinas donde se transforma en energía eléctrica, que luego pasa a la subestación donde se eleva la tensión o voltaje.

#### **6.3.1. De acuerdo con el tipo de Turbinas:**

De acuerdo con los tipos de Centrales, las turbinas pueden ser de diferentes tipos: (*Velásquez, 19 noviembre 2002*)

- ✓ Pelton: Para caudales pequeños y saltos grandes

- ✓ Francis: Para saltos más cortos con mayores caudales
- ✓ Kaplan: Caudal muy grande con salto muy pequeño
- ✓ De hélice.

Desarrollan el componente de producción de energía, mediante infraestructuras que atienden a diferentes conceptos de diseño, permitiendo su clasificación de acuerdo con el uso del agua y la tecnología que utilizan.

### **6.3.2. De acuerdo con el Uso del agua:**

#### **6.3.2.1. Centrales de Agua Fluente, de agua corriente, o de agua fluyente.**

Se construyen donde la energía hidráulica se debe utilizar de forma inmediata para accionar las turbinas hidráulicas pues carecen reservorio de agua. El caudal oscila según las estaciones del año, de forma que en época de abundantes precipitaciones pueden desarrollar su potencia máxima dejando pasar los excedentes de agua, mientras en época de estío disminuyen la potencia de acuerdo con el caudal.

Para su construcción se construyen presas sobre el cauce de los ríos, con el fin de mantener un desnivel constante en la corriente de agua.

#### **6.3.2.2. Centrales de Agua Embalsada:**

Requiere de grandes lagos o de pantanos artificiales conocidos como embalses, que se logran mediante la construcción de presas donde se almacenan los caudales de los ríos afluentes. El agua se utiliza según la demanda, a través de conductos que la encauzan hacia las turbinas.



### **6.3.2.3. Centrales de Regulación:**

Prestan la posibilidad de almacenar volúmenes de agua en el embalse, por periodos más o menos prolongados de aportes de caudales medios anuales.

Son útiles en condiciones de bajos caudales, pues el almacenamiento continuo permite regular el uso en forma conveniente.

### **6.3.2.4. Centrales de Bombeo**

También llamadas 'de acumulación' porque captan y almacenan caudal mediante bombeo, acumulando energía potencial. Pueden ser de turbina y bomba, o de turbina reversible.

El generador que bombea desde aguas abajo, se puede alimentar desde otra central hidráulica, térmica o nuclear, lo que reduce su rentabilidad.

## **6.3.3. De acuerdo con el Salto Hidráulico:**

Atendiendo a la altura del salto o desnivel la centrales hidroeléctricas pueden ser:

### **6.3.3.1. Centrales de Alta Presión:**

Incluye aquella cuyo salto hidráulico supera los 200 metros de altura. Los caudales que se desalojan son aproximadamente de 20 m<sup>3</sup>/s por máquina.

Se ubican en zonas de alta montaña donde captan el agua de torrentes, por medio de conducciones de gran longitud. Utilizan turbinas Pelton y Francis.

### **6.3.3.2. Centrales de Media Presión:**

Tienen saltos hidráulicos de entre 20 a 200 metros. Utilizan caudales de 200 m<sup>3</sup>/s por turbina.

Cuando se ubican en zonas de media montaña, requieren de embalses. Las turbinas que utilizan son Francis y Kaplan, y en caso de grandes saltos, utilizan la Pelton.

### **6.3.3.3. Centrales de Baja Presión:**

Los saltos hidráulicos son inferiores a 20 metros. Cada máquina requiere un caudal que puede superar los 300 m<sup>3</sup>/s. Las turbinas son de tipo Francis y Kaplan.

### **6.3.4. De acuerdo con las Presas:**

De acuerdo con la forma de su estructura y los materiales que se utilicen, las presas pueden construirse en hormigón o con elementos sin trabar.

Las más comunes son las presas de hormigón las que de acuerdo con su estructura pueden ser de gravedad, de bóveda y de contrafuertes.

Las presas de elementos sin trabar se construyen con piedra o con tierra. Aunque también pueden construirse presas mixtas.

#### **6.3.4.1. Presas de gravedad**

Tienen sección triangular; su base es ancha y se va estrechando hacia la parte superior; la cara hacia el embalse es casi vertical. Su vista desde arriba muestra una geometría recta o una curva suave. La altura la determina la resistencia del terreno.

Su estabilidad depende de su propio peso. Su período de vida es largo y requiere bajo mantenimiento. Su altura suele estar limitada por la resistencia del terreno.

#### **6.3.4.2. Presas de bóveda**

Utiliza los criterios teóricos de la bóveda. Tiene una curvatura convexa dirigida hacia el embalse, con el fin que la carga se distribuya hacia los extremos de toda la presa.

Es difícil hallar sitios adecuados para su construcción.

#### **6.3.4.3. Presas de contrafuertes**

Tienen una pared que soporta el agua seguido de una serie de pilares de forma triangular que sujetan la pared y envían la carga de agua a la base.

Las presas de contrafuertes son de diversos tipos siendo los más comunes los de planchas uniformes y de bóvedas múltiples. (*Velásquez, 19 noviembre 2002*)

En las de planchas uniformes el agua es contenida en un conjunto de planchas que cubren la superficie entre los contrafuertes. En las de bóvedas múltiples, éstas permiten que los contrafuertes estén más espaciados.

#### **6.3.4.4. Presas de elementos sin trabar**

En las presas de tierra y piedra se emplean materiales naturales con mínima transformación.

La tecnología en maquinarias como las excavadoras ha puesto este tipo de presas a competir con las de hormigón, por sus bajos costos.

El ancho de la base de este tipo de presas es de cuatro a siete veces mayor que su altura. El monto de las filtraciones es inversamente proporcional a la distancia que debe recorrer el agua.

Se pueden construir con materiales impermeables en su totalidad, o formarse por un núcleo de material impermeable reforzado por los dos lados con materiales más permeables, como arena, grava o roca, el núcleo debe extenderse hasta mucho más abajo de la base para evitar filtraciones.

*(Velásquez, 19 noviembre 2002)*

#### **6.4. Aproximación Teórica sobre las interacciones del suelo con el ecosistema**

El suelo puede considerarse como la plataforma fundamental para el desarrollo de las funciones del planeta y el sustento para la existencia de la vida como se conoce. El componente litológico ha pasado de ser considerado como un elemento inerte a ser comprendido como un escenario donde se dan procesos dinámicos en los que interacciona el agua y los gases de la atmósfera, hasta procesos vitales en los que se desarrollan micro ambiente que favorecen presencia de fauna a nivel del subsuelo.

Las ciencias que estudian el suelo, lo consideran como el complejo de sedimentos no consolidados, *“fruto de la alteración de las rocas, o suelos transportados por agentes como el agua, hielo o viento con contribución de la gravedad como fuerza direccional selectiva, y que pueden tener materia orgánica.”* (Escobar & Potes, 2014)

Por su heterogeneidad, la ciencia ha desarrollado métodos para aplicar las leyes de la mecánica a las manifestaciones de deformación del suelo para lo que es necesario observar y caracterizar las propiedades, el comportamiento y el uso del suelo como material estructural.

La Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura – FAO – ha definido el suelo como el medio natural donde crecen las plantas, pero también como el cuerpo natural que se conforma por horizontes o capas que están compuestas por minerales, materia orgánica, aire y agua, producto de las interacciones que con el paso del tiempo han influenciado su formación como el clima, la topografía, organismos vivos, material parental, lo que explica las diferencias en textura, estructura, consistencia, color y propiedades físico-químicas y biológicas que se presentan entre los suelos de un lugar a otro. (*Organización de Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura - FAO, 2017*)

#### **6.4.1. Fuerzas de filtración y gradiente crítico.**

Las aguas subterráneas se mueven en forma horizontal. Cuando el agua aflora en un punto, obedece al gradiente dado por una diferencia de energía entre dos puntos A y B, que bien puede estar dada por la recarga o por diferencias en el nivel del agua. Esta diferencia respecto de la distancia entre los dos puntos es designada como Gradiente hidráulico  $i$  que puede expresarse en la siguiente ecuación:

Ecuación 1

$$i = \frac{h_A - h_B}{L} = \frac{\Delta h}{L}$$

Donde  $h_A$  y  $h_B$  son los puntos entre los cuales se da la variación.

$L$  es el tramo o distancia entre los puntos A y B

Al movimiento del agua se le llama “*flujo*” y en el suelo genera dos tipos de fuerza: una fuerza conocida como “*presión hidrostática*” y otra dada por la carga hidráulica conocida como “*presión de filtración*” – $p_f$ – que relaciona el punto topográfico con la carga hidráulica  $\gamma$ , que también es

igual al producto del gradiente hidráulico –i- por la longitud del tramo L por la masa o carga hidráulica  $\gamma$

Ecuación 2

$$p_f = h * \gamma_{agua} = i * L * \gamma_{agua} =$$

Las fuerzas de fricción, la estructura del suelo y su cohesión, se oponen al flujo actuando en sentido contrario, con lo que se equilibra la fuerza de la presión de filtración, en lo que se conoce como el *gradiente crítico*.

#### **6.4.2. Fuerzas de Tubificación y sifonamiento**

Cuando el gradiente crítico es superado por las fuerzas de la presión de filtración, las fuerzas de contención se disuelven dando lugar a procesos erosivos. (*Badillo & Rodríguez, 2004*) A esta situación se le conoce como “*tubificación*” y se califica como “*retrógrada*” cuando su acción es continua el problema se magnifica pues se amplía su área de impacto erosivo. (*Valcárcel, 2012*)

El sifonamiento surge como consecuencia de la acción de las fuerzas de filtración, modificadas por las características de permeabilidad de los horizontes.

Si estas fuerzas tocan un punto donde anulan la tensión efectiva que se da entre partículas de los materiales que componen el suelo, que normalmente tendrían un sentido descendente, se presenta el sifonamiento, similar al fenómeno de la física de caída libre de los cuerpos. (*Rayano, diciembre 2016*) Al anular las fuerzas de resistencia, el suelo pierde su cohesión y su resistencia al corte.

De lo señalado hasta aquí, tanto la tubificación retrógrada como el sifonamiento, son dos fenómenos que pueden presentarse en todos los suelos y son causa de pérdida de éstos.

### 6.4.3. La capilaridad

Aunque el movimiento del agua en el suelo es dinamizado por la fuerza de gravedad con un gasto energético mínimo, en su paso de un punto a otro desarrolla un trabajo. Al respecto, sin duda que el agua al moverse bajo mínimos energéticos, la escorrentía subterránea admite que la dirección del movimiento hidráulico será horizontal por diferencias en altura piezométrica o por el volumen de la masa de agua; pero también será vertical o en descenso en el caso de la percolación del agua lluvia.

Pero queda el interrogante sobre la posibilidad que las aguas del subsuelo también puedan presentar movimiento ascendente. Para quienes analizan la función de las coberturas nativas en terrenos donde abundan las precipitaciones, es claro que las funciones de absorción que ejercen las plantas, generan una fuerza ascendente que dan lugar a la humedad de la zona vadosa y adicionalmente a una oferta permanente de agua.

Gráficamente y con esta descripción, se puede interpretar la fuerte relación de las aguas subterráneas con los sitios de afloramiento de aguas a la superficie, en particular en aquellas zonas donde las cabeceras de nacimientos se encuentran protegidas con coberturas vegetales que contribuyen con la función de capilaridad<sup>5</sup> con la cual toman nutrientes del suelo y cumplen su función de respiración e intercambio con la atmósfera.

---

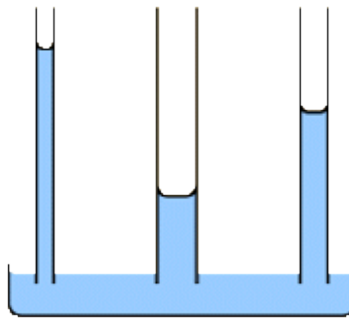
<sup>5</sup> *La capilaridad consiste en el ascenso de líquidos por tubos muy estrechos. El ascenso se produce por la fuerza de atracción de las moléculas del líquido, y la superficie interior del tubo donde hay fuerzas de adhesión. La atracción entre las moléculas del líquido también se conocen como fuerzas de cohesión y son responsables de la condensación.*

*En contacto con los cuerpos sólidos, los líquidos tienden a expandirse. Para ello se requiere vencer las fuerzas internas que se oponen a la expansión. A esta energía necesaria para tener una mayor área superficial donde se trasladen las moléculas del líquido se conoce como tensión superficial. El agua tiene un alto coeficiente de tensión superficial. (Cristobal Muñoz, 2015)*



Fuente: (Vásquez, 30 abril 2014)

Pero la capilaridad también es una función física que se puede cumplir bajo ciertas condiciones del suelo. Como regla general, las fuerzas de adhesión molecular y la tensión superficial, son responsables de la capilaridad, fenómeno de la materia en estado líquido que le permite subir o bajar por un tubo capilar. (Morales., 2010)

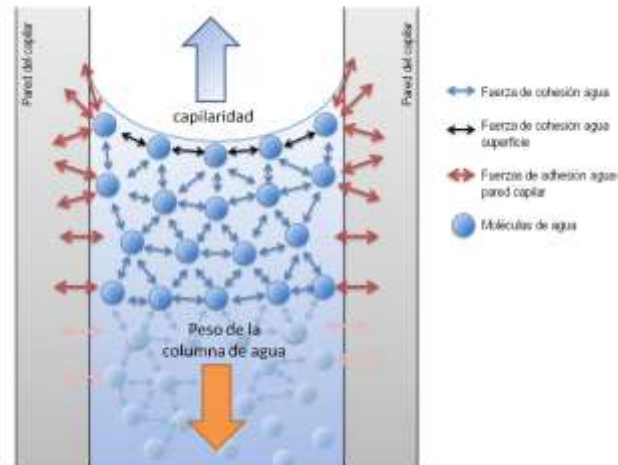


Fuente: (Morales., 2010)

---

La capilaridad es una propiedad derivada de la tensión superficial que también es aprovechada por las plantas en sus procesos de nutrición y respiración.





Fuente: (Manus, 2013)

#### 6.4.4. Principio de Arquímedes y Principio de Pascal (Vasos comunicantes).

El Principio de Arquímedes dice que los cuerpos sumergidos en un fluido, experimentan un empuje vertical hacia arriba cuya magnitud es igual a la masa o peso del líquido que fue desalojado. Esta fuerza es conocida como empuje hidrostático. (Krassik, 2013)

Ecuación 3.

$$|E| = m g = \rho_f g V$$

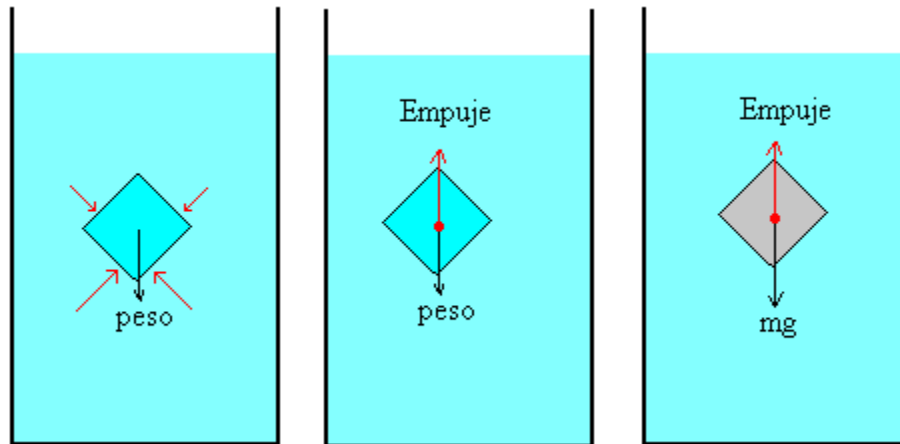
El principio se compone de dos partes: Una parte estudia las fuerzas sobre una parte del líquido que se encuentra en equilibrio respecto del resto del fluido.

Una segunda parte es la sustitución de esa parte de fluido por el volumen de un sólido con las mismas proporciones. (Custom Glitter Text, 2010) El peso de la porción de fluido desplazado por el sólido es igual al producto de la densidad del fluido  $\rho_f$  por la aceleración de la gravedad  $g$  y por el volumen de dicha porción. (Custom Glitter Text, 2010)

## Ecuación 4

$$\text{Empuje} = \text{peso} = \rho_f * g * V$$

Ecuación que se ve reflejada en los siguientes diagramas.



Fuente: (Krassik, 2013)

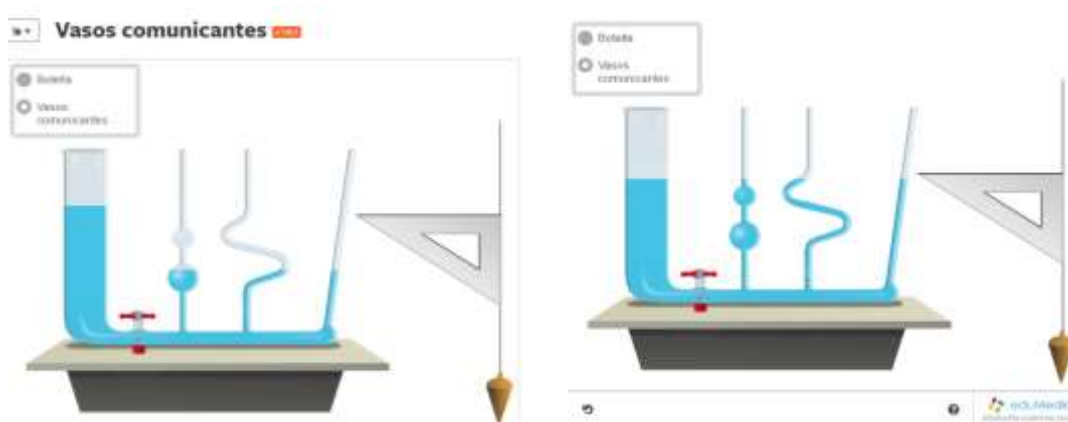
Las fuerzas atribuibles a la presión son constantes, por tanto el empuje es el mismo en un punto conocido como “*centro de empuje*” y solo varía el peso del sólido cuyo punto de aplicación es el “*centro de masa*” que puede coincidir o no con el centro de empuje.

Así se tienen dos fuerzas simultáneas: Peso del cuerpo que es una fuerza vectorial vertical descendente, y fuerza de empuje que tiene una fuerza vectorial ascendente. La presión superior debida al fluido está representada como el punto 1:  $P_1 = \rho_f g x$  La presión en la zona inferior representada como punto 2 =  $P_2 = \rho_f g(x + h)$

La presión lateral depende de la altura y su valor está comprendido entre  $p_1$  y  $p_2$ . (*Custom Glitter Text, 2010*)

Desde la perspectiva del Principio de Arquímedes, el análisis de sólidos incorporados en los líquidos tienen comportamientos y fuerzas diferentes a las que actúan bajo el Principio de Pascal respecto de líquidos incorporados en los sólidos.

Uno de ellos, la capilaridad que ya fue objeto de análisis se relaciona con el ascenso de líquidos por tubos capilares, y otro corresponde al fenómeno de los vasos comunicantes que opera bajo la regla según la cual el líquido contenido en varios recipientes comunicados entre sí, siempre va a tener la misma altura en cada uno de ellos, independiente de la forma del recipiente siempre que el líquido tenga una densidad uniforme. (Salazar, 2014)



Fuente: (Luz, 1998)

El fenómeno se explica por la presión atmosférica y la fuerza de gravedad que en los recipientes de pared indeformable son constantes, de modo que a una profundidad  $x$  la presión hidrostática siempre tiene el mismo valor. (ECURED, 2017)

La presión ejercida sobre un mol de un líquido se transmite con la misma intensidad en todas las direcciones, demostrando que la presión hidrostática depende de la altura. Esto fue demostrado por Blaise Pascal en el Siglo XVII comunicando cuatro tubos por su base.

La velocidad con la que el líquido se desplaza del contenedor hacia los demás recipientes, está dada por el teorema de Torricelli, según el cual la velocidad de salida de un fluido por un orificio ubicado al fondo de un recipiente es la raíz del doble producto de la gravedad por la altura:

Ecuación 5

$$V = \sqrt{2 (g * h)}$$

Este principio funciona en la misma forma, cuando es aplicado al fluido de líquidos en el subsuelo y admite que el líquido ascienda por entre capas permeables hasta alcanzar la superficie y aflorar de manera permanente mientras se encuentre activa la zona de recarga situada en una cota superior.

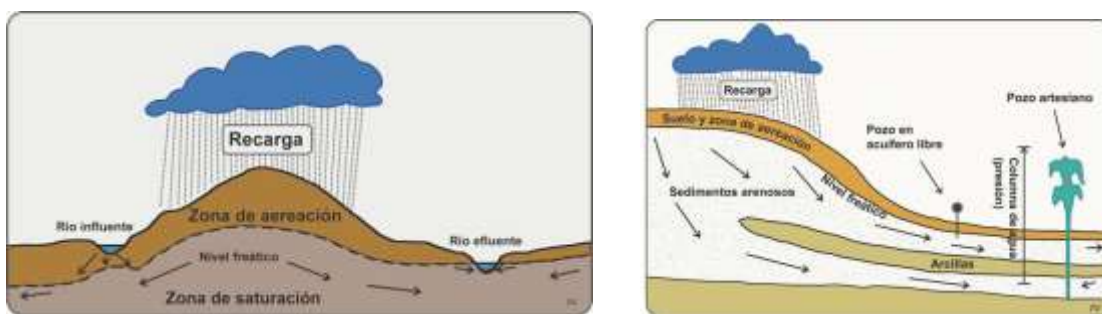
#### **6.4.5. Física del afloramiento de aguas**

Las plantas sustraen alimento del suelo, estimulando el ascenso de aguas del subsuelo dando lugar a un excedente que se libera como aguas superficiales, o como evapotranspiración.

Pero otras formas que estimulan el surgimiento de aguas en superficie atienden a leyes de la física que tienen que ver con el acontecimiento de eventos que son explicados por el principio de Arquímedes o por la Ley de Pascal.

La capilaridad y la tensión superficial son dos propiedades de los líquidos, que explican su comportamiento ante fuerzas naturales como el movimiento de rotación planetario, la presión atmosférica y la fuerza de gravedad, que acompañadas de características de permeabilidad de los horizontes, puede favorecer el afloramiento de fuentes naturales de agua.

La infiltración en el suelo o por entre rocas en las zonas de recarga es una función natural del ecosistema en el ciclo del agua, que generalmente se presenta en zonas altas o de cordillera. Por ello las mayores coberturas de vegetación nativa se presentan en estas crestas de montaña, donde además es visible la gran oferta de nacimientos que afloran a lo largo de las laderas, indicando las posiciones que va tomando el acuífero que los alimenta. (Rey, 2016)



Fuente: (INSUGEO, 2017)

Para facilitar la comprensión de estas interacciones del ecosistema, se puede contar con el apoyo gráfico de un corte de suelo explicativo, donde se distinguen las zonas que separan el depósito acuífero del subsuelo con la superficie.



Fuente: (Slide Share, 2012)

El ciclo del agua en la naturaleza sigue ritmos que están vinculados con las condiciones climáticas, estacionarias y de temperatura, pero la vegetación nativa cumple una función reguladora garante de la oferta permanente de agua y la alimentación continua de la cuenca.

La zona vadosa es una sección intermedia entre el techo del acuífero con su franja capilar, y la sub-zona de evapotranspiración. Cuando el acuífero aflora a superficie obedece al movimiento lateral provocado por el gradiente topográfico, pero también puede surgir por efecto de presión atmosférica. Es cuando el nivel freático asciende saturando la zona vadosa llegando a la franja donde el cambio de temperatura hace que el agua se evapore.

#### **6.4.6. Presión atmosférica o barométrica**

Se habla de presión solo cuando se trata de gases o de líquidos. En los sólidos se denomina esfuerzo normal. (*Cengel & Cimbala, 2006*) La fuerza que ejerce un fluido por unidad de área, se conoce como presión, y tratándose de gases, el peso del aire en una superficie terrestre por unidad de un área determinada es lo que se conoce como presión barométrica y la misma varía de acuerdo con la elevación y las condiciones atmosféricas. A mayor altura es menor. (Menor presión, menor temperatura, menor densidad de aire)

Ello repercute en muchas situaciones cotidianas como el menor tiempo en que el agua alcanza el punto de ebullición; la presión sanguínea respecto de la presión atmosférica es más elevada; en zonas más altas la densidad del aire es más baja por lo tanto hay menos oxígeno, y todo trabajo demanda un mayor esfuerzo.

Si se analiza la situación de la presión en razón de la profundidad, se encuentra que aquella aumenta a medida que desciende a capas inferiores, pero se mantiene si se mide horizontalmente.

La estática de fluidos o hidrostática, versa sobre los fluidos en reposo, donde no hay movimiento relativo o de intercambio, lo que descarta esfuerzos tangenciales que lo puedan deformar. El único esfuerzo a considerar es el esfuerzo normal debido al peso propio, esto es la incidencia de la fuerza de gravedad y otras fuerzas naturales como la aceleración gravitacional.

Se utiliza para identificar las fuerzas actuantes sobre cuerpos flotantes y los sumergidos, y caracterizar su magnitud, su dirección y la línea en que actúa la fuerza. De esta identificación de fuerzas actuantes pueden realizarse descripciones del movimiento o cinemática del fluido.

El método más común para describir el flujo de líquidos es la *descripción euleriana*, mediante la cual se define un volumen (dominio del flujo), a través del cual un fluido circula hacia adentro o hacia afuera. (Cengel & Cimbala, 2006). Para determinarlo es necesario definir unas variables de campo, funciones de espacio y tiempo dentro del volumen de control.

La descripción del movimiento de las partículas en mecánica de fluidos relaciona cambios en un volumen de control respecto de las variaciones de un sistema, que se explica con el Teorema del Transporte de Reynolds. (Cengel & Cimbala, 2006), donde la razón de cambio en el tiempo respecto de una propiedad se correlaciona con los cambios en el sistema, de modo que el flujo de entrada y el flujo de salida se asocian con esas variaciones en la propiedad y en el sistema lo que se explica mediante un balance de masa, a través de una razón neta de flujo de entrada y del flujo de salida, en procesos de flujo estacionario.

Obtener una aproximación sobre la dirección y velocidad del flujo, es posible si se utiliza la ecuación de Bernoulli, en la cual se relacionan las variables presión, velocidad y elevación. El movimiento y la trayectoria de una partícula lo define la velocidad, mientras “*la energía cinética y la potencial del fluido pueden convertirse a energía de flujo y viceversa*”, (Cengel & Cimbala,

2006), incidiendo sobre variaciones en la presión, de modo que la sumatoria de la presión estática, con la presión dinámica y la hidrostática es la presión total a lo largo de la línea de la corriente.

La presión de estancamiento es la fuerza sobre un punto donde el fluido se detiene totalmente, y equivale a la sumatoria de la presión estática y la presión dinámica. Si la presión estática y la presión de estancamiento superan la presión atmosférica, el líquido tiende a ascender, fuerza que puede incrementarse con la capilaridad.

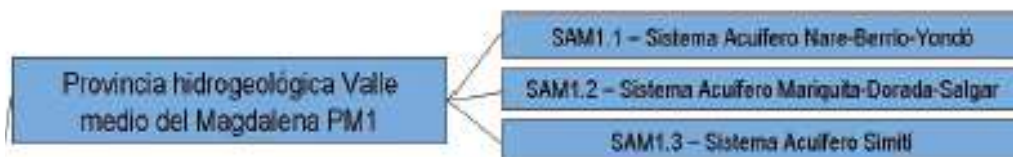
El gradiente hidráulico o piezométrico mide la fuerza de presión en ascenso vertical hasta lograr la línea de energía.



## 7. Estado del Arte

La zona de interés se ubica en la Provincia Hidrogeológica Valle Medio del Magdalena PM 1.

Sistema Acuífero Mariquita – Dorada – Salgar SAM1.2



Fuente: (IDEAM, Noviembre, 2013)

### 7.1. Zona Hidrogeológica Valle Medio del Magdalena

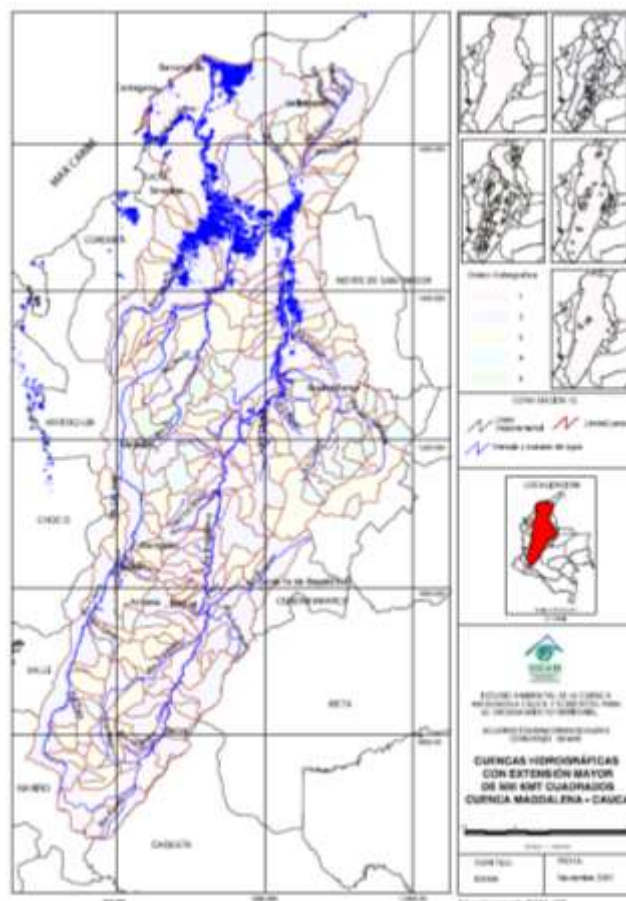
El territorio de la zona central de Colombia posee un sistema hidrográfico demarcado por los siguientes límites: (IDEAM - CORMAGDALENA, Noviembre, 2001)

Al occidente lo delimita la cuenca de los ríos Atrato – San Juan. En el centro la cordillera Andina dividida en sus tres ramales a partir del macizo colombiano, entre los cuales se forman dos valles así: Entre la cordillera occidental y central se forma el valle del Guaitara, Patía y Cauca.

Entre la cordillera central y la oriental se forma el valle del río Magdalena y Cesar. En el nororiente se localiza la cuenca del río Catatumbo, mientras al sur se emplazan los ríos que nacen en la Serranía de la Macarena y la Cordillera oriental, formando los sistemas fluviales del Orinoco y el Amazonas.

La Zona Hidrográfica Magdalena – Cauca es un territorio complejo por cuanto alberga la mayor presión antrópica y por ende el mayor riesgo ambiental. En materia de generación de energía eléctrica, esta zona se genera el 95% de energía termoeléctrica y 70% de la hidroeléctrica.

La ubicación geográfica del territorio colombiano permite que sus condiciones climáticas presenten ciclos alternados de precipitaciones y sequías.



Fuente: (IDEAM - CORMAGDALENA, Noviembre, 2001)

Alrededor del río Magdalena se presenta un complejo de ciénagas y madrevejas, formando un sistema natural regulador y de amortiguamiento, que en invierno almacenan el excedente hídrico y en sequía dejan liberar el agua.

En la cuenca se encuentra un complejo sistema hidrológico de diverso orden, caudal y forma de drenaje, con un estimado de unos 500 ríos, además de quebradas y caños.



## 7.2. Sub-cuenca del río La Miel en la ZH del VMCC

De acuerdo con el mapa de esorrentía, la zona de la Miel es una de las dos áreas con mayor esorrentía en la Zona Hidrológica Magdalena – Cauca, con lluvias entre 3000 y 4000 mm.

Aunque el Estudio Nacional del Agua 2014, no identifica la cuenca del río Samaná – La Miel en la Provincia Hidrogeológica Mariquita – Dorada - Salgar, los estudios de la zona confirman su presencia formando parte del Acuífero del grupo Honda.

Continuación Tabla 3.3

Provincia hidrogeológica	Código	Sistema acuífero	Unidades hidrogeológicas	Tipo de acuífero	Parámetros hidráulicos		Área superficial (Km <sup>2</sup> )
PM1 Valle medio del Magdalena	SAM1.1	Valle medio del Magdalena	Acuífero Terrazas del río Magdalena, Acuífero depósito aluvial del Río Magdalena, Acuífero Mesa (NgQp), Acuífero Real (NgQ), Acuífero La Luna y Acuífero Tablazo y Rosablanca	Libres, semiconfinados a confinados y cáusticos	B= 80 a >800 m K= 5 a 12 m/d	T= 150 a 280 m/d S= 4.0x10 <sup>-4</sup> a 6.0x10 <sup>-4</sup> Ss= 1.0 a 2.0 %/m	14.913
	SAM1.2	Mariquita-Dorada-Salgar	Acuífero de depósitos aluviales y terrazas del río Magdalena, Acuífero del Cono aluvial de Lirida y del sistema volcánico, Acuífero del grupo Honda (Formaciones Mesay, San Antonio), Acuífero San Juan de Roseco y Acuífero Hoyón	Libre a confinado			5.714
	SAM1.3	Abanico de Aguachica	Depósitos coluviales: Serranía los Motilones, Acuífero depósito fluvial del río Magdalena, Acuífero depósito coluvial de Aguachica (Qc) y Acuífero Abanico de Aguachica (NgQp)	Libres a semiconfinados	B= 80 a 400 m K= 0.2 a 8 m/d	T= 80 m/d S= 1.0x10 <sup>-3</sup>	3.869

Estudio Nacional del Agua 2014

134

Tabla 4- Zona Hidrológica Valle Medio del Magdalena Fuente: (IDEAM, Mayo, 2015)

La red nacional de aguas subterráneas señala que en Colombia se han delimitado 16 cuencas y 12 regiones hidrogeológicas, con límites impermeables para el flujo regional de aguas subterráneas. Las Cuencas Hidrogeológicas que pertenecen a esta red nacional son:

1. Plegada de la Cordillera Oriental
2. Valle Superior del Magdalena

3. Valle medio del Magdalena
4. Valle del Cauca - Patía
5. Cesar – Ranchería
6. Sinú-San Jacinto
7. Urabá
8. Valle Inferior del Magdalena
9. Guajira
10. Choco-Pacífico
11. Tumaco
12. Catatumbo
13. Llanos Orientales
14. Caguan-Vaupés Amazonas y Putumayo
15. San Andrés Islas

Y aunque la Zona Hidrogeológica del Valle Medio del Magdalena pertenece a ésta red, integrada por dos Sistemas acuíferos: Nare-Berrio-Yondo y Mariquita-Dorada- Salgar allí tampoco está caracterizada la zona oriente del departamento de Caldas, lo que se extrae de la información consultada.

En cuanto a su localización y descripción se consigna que este territorio de la cuenca del Valle Medio del Magdalena “*Corresponde a la extensión hacia el norte del valle superior del río Magdalena. Abarca parte de los departamentos de Santander y Boyacá*” (Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial , Mayo 21 - 22 de 2009)

Sobre los Límites geológicos, la cuenca se enmarca entre la “*Falla de Ibagué al Sur, Falla de Murrucucú al Norte, Falla de Mulatos al Occidente y Falla de la Salina al Este.*” (Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial , Mayo 21 - 22 de 2009)

Producción de agua en m<sup>3</sup> /año es de  $20 * 10^6$

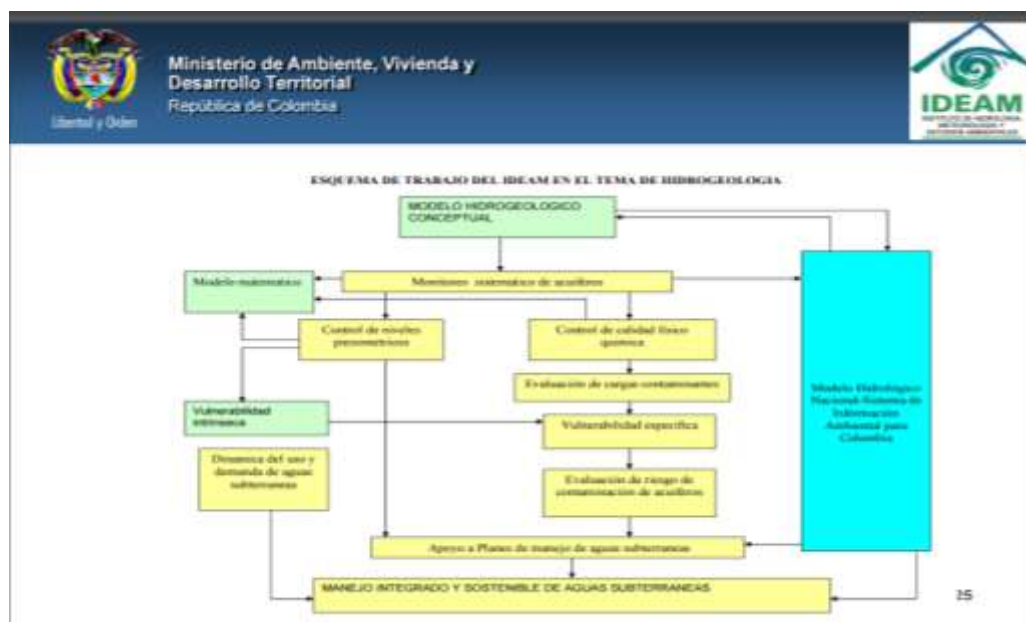


Tabla 5- Esquema de trabajo IDEAM en Hidrogeología. Fuente: (Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial , Mayo 21 - 22 de 2009)

Con relación a las Unidades geológicas de importancia hidrogeológica, se identifican “*Depósitos de origen fluvial a lacustre (30% de estratos arenosos) del terciario detrítico que forman acuíferos libres a confinados*” (Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial , Mayo 21 - 22 de 2009)

Los Puntos de agua que se identificaron son Pozos entre 40 y 350 m de profundidad, de los que se caracterizan como propiedades hidráulicas “*Caudales entre 3 y 50 l/s, transmisividad entre 17 y 450 m<sup>2</sup> /día, capacidades específicas 3 y 4,5 l/s/m*” (Ministerio Ambiente, Vivienda y









La provincia hidrogeológica del Valle Medio del Magdalena, está compuesta por tres principales sistemas de acuíferos: (*HIDROVISOR - ASVAMM , 2017*)

### **1. Sistema de acuíferos Valle Medio del Magdalena.**

Sistema compuesto por 6 unidades:

- ✓ Acuífero Terrazas del río Magdalena,
- ✓ Acuífero deposito aluvial del río Magdalena,
- ✓ Acuífero Mesa (NgQp),
- ✓ Acuífero Real (Ngc),
- ✓ Acuífero la Luna
- ✓ Acuífero Tablazo y Rosablanca.

Tipos de acuíferos identificados: Libres, Semiconfinados a confinados y cársticos.

### **2. Sistema de acuíferos Mariquita-Dorada-Salgar.**

Se compone de cinco unidades de tipo libre a confinado, a saber

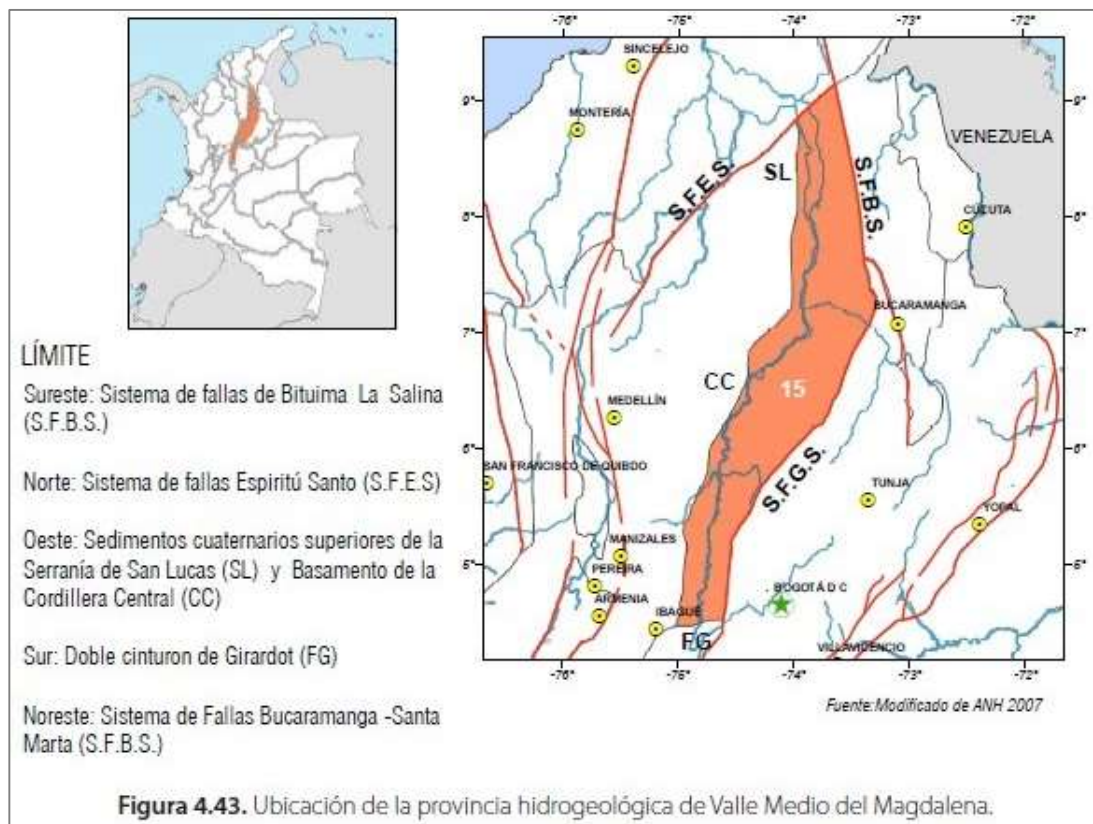
- ✓ Acuífero de depósitos aluviales y terrazas del río Magdalena,
- ✓ Acuífero del Cono aluvial de Lérida y del sistema volcánico,
- ✓ Acuífero del grupo Honda (Formaciones Mesa y San Antonio),
- ✓ Acuífero San Juan de Rioseco y
- ✓ Acuífero Hoyón.

### **3. Sistema de Aguachica.**

En este tercer sistema se encuentran las siguientes estructuras de tipo libre a confinado:

- ✓ Depósitos coluviales Serranía los Motilones,
- ✓ Acuífero depósito fluvial del río Magdalena,
- ✓ Acuífero depósito coluvial de Aguachica (Qc)
- ✓ Acuífero Abanico de Aguachica (NgQp)

La cuenca intramontana del Valle Medio del Magdalena tiene un área aproximada de 34.000 km<sup>2</sup>. En ella se encuentran 45 municipios que pertenecen a 9 departamentos: Tolima, Caldas, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Santander, Norte de Santander, Bolívar y Cesar. La gran actividad económica y estar ubicado en ella el epicentro político del país, hacen que esta zona sea muy dinámica y por lo tanto está expuesta a la mayor presión por su oferta ambiental.

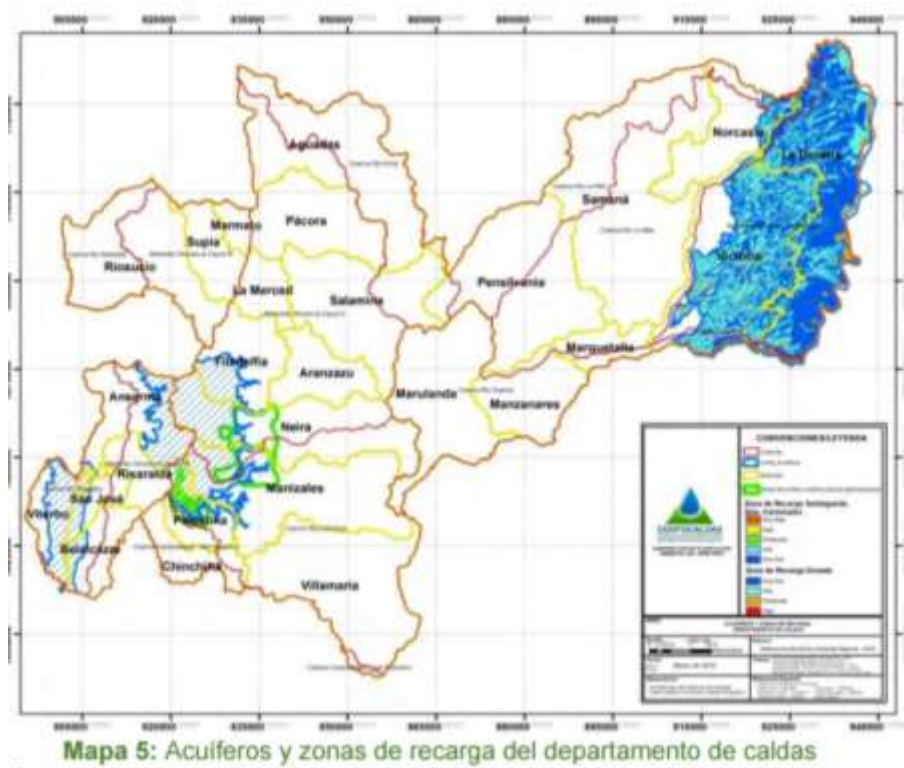


Fuente: (HIDROVISOR - ASVAMM , 2017)

### 7.3. Malla hídrica del departamento de Caldas

La estructura hídrica del territorio del departamento de Caldas se caracteriza por tener una distribución de las aguas determinada por las cordilleras central y occidental que alimentan las cuencas mayores del río Magdalena y del río Cauca.

El territorio del oriente del departamento presenta tres grandes ríos que nacen en la cordillera central y transcurren hasta depositar sus corrientes en el río Magdalena. Son estos ríos el Guarinó, el Samaná y La Miel, que a su vez reciben las aguas de otras importantes corrientes locales, cuyos caudales se nutren no solo de las precipitaciones características de la zona por donde discurren estos caudales, sino con los recursos hídricos de tipo subterráneo, cumpliendo con el ritual del ciclo del agua.



Fuente: (CORPOCALDAS, 2016)

Según el organismo ambiental de Caldas, la red hídrica superficial del departamento se compone aproximadamente de 22.373 drenajes, de los cuales 7.363 se ubican en la vertiente hidrográfica del Medio Magdalena mientras hacia la zona hidrográfica del Cauca fluyen 15.010 drenajes.

Sin embargo conforme con el mapa de Acuíferos y Zonas de Recarga contemplado en el Plan de Acción Institucional 2016 – 2019 de la Corporación Autónoma Regional no registra acuíferos en la zona de la cordillera central que estén cumpliendo la función de recarga con capacidad de alimentar las cabeceras de los nacimientos de los drenajes que fluyen tanto hacia el río Cauca como hacia el río Magdalena, lo que traduce que los caudales de estas aguas superficiales pueden estarse abasteciendo de agua de los páramos y de los glaciares.

## 8. Antecedentes

Tres cuartas partes de la superficie del planeta, cerca del 71%, es agua. Una fracción del 97.5% del agua existente en la tierra es agua salada, albergada en su mayor parte en mares y océanos. El restante 2.5% es agua dulce.

El siguiente cuadro muestra una distribución más precisa:

Localización	Porcentaje de agua total	Tipo de agua
Mares y océanos	96,5 %	Salada
Casquetes y glaciares polares	1,74 %	Dulce
Agua subterránea salada	0,94 %	Salada
Agua subterránea dulce	0,76 %	Dulce
Glaciares continentales y permafrost*	0,022 %	Dulce
Lagos de agua dulce	0,007 %	Dulce
Lagos de agua salada	0,006 %	Salada
Humedad del suelo	0,001 %	Dulce
Atmósfera	0,001 %	Dulce
Embalses	0,0008 %	Dulce
Ríos	0,0002 %	Dulce
Agua biológica	0,0001 %	Dulce

\* Permafrost: capa de hielo permanente en los niveles superficiales del suelo de las regiones muy frías o periglaciales

Fuente: (Cristina Mauleón Marín, 2015)

De este 2.5%, que corresponde a agua dulce, el 69% se encuentra en estado sólido en los glaciares ubicados en las cumbres nevadas y en las zonas ártica y antártica. Un 30% adicional se encuentra en el suelo y en depósitos subterráneos, en tanto que el 1% restante es el agua que circula en la superficie en ríos, arroyos, lagos, humedales y otras formaciones de las cuencas hidrográficas. (Mazatlan, 2017)

Las aguas subterráneas que ofertan el 30% del agua dulce total del planeta, (Solar, Octubre, 2013) constituyen una alternativa frente al riesgo de desabastecimiento al que están expuestas las comunidades en toda la superficie del planeta, por lo que su estudio ha despertado gran interés.

La preocupación por la conservación esta oferta de agua subterránea se ha manifestado de forma evidente mediante una nutrida reglamentación de acciones de los gobiernos que se viene desde los estrados internacionales hasta los territorios locales, como pasa a enunciarse:

### **8.1. Internacional.**

Los gobiernos en muchos países se han venido comprometiendo con la gestión del recurso hídrico, como podrá advertirse a continuación de la abundante relación de instrumentos:

- ✓ La Declaración de Madrid de 1911 del ILA Regulación Internacional sobre uso de los cursos de aguas internacionales para propósito distinto de la navegación.

Aportó para el desarrollo de la “*Teoría de la comunidad de intereses entre los Estados ribereños*” y se utilizó en el caso del Río Oder en 1929. Las recomendaciones de Madrid fueron:

- 1.- Prohibición de lanzar substancias perjudiciales para el agua;
- 2.- Los Estados no pueden alterar seriamente la naturaleza del río;
- 3.- El Estado que realiza una obra que pueda afectar a otro Estado debe implementar obras para evitar el peligro de la inundación.

- ✓ La Resolución de Salzburgo versó sobre usos de aguas no marítimas internacionales ILA, 2000. Por primera la resolución alcanza el uso de las aguas de una cuenca hidrográfica que se extienda al territorio de dos o más Estados. No incluyó las aguas subterráneas
- ✓ Las Reglas de Helsinki de la ILA, de 1966 se ocuparon de las aguas subterráneas.

Estas reglas fueron aprobadas en la 52ª Conferencia de la Asociación de Derecho Internacional, y se fundamentó la relatoría de la Comisión sobre uso de las aguas de ríos internacionales.

Por primera vez se menciona el concepto de cuenca como *“un área geográfica que se extiende entre dos o más Estados y es determinada por los límites del área de alimentación del sistema de aguas, incluyendo las aguas superficiales y subterráneas que desembocan en una desembocadura común mientras que el Estado de la Cuenca es un Estado cuyo territorio incluye una porción de la cuenca de drenaje internacional.”*

- ✓ Reglas de Bonn, ILA 2001 Conferencia Internacional sobre agua dulce. Establece una definición sobre acuífero como *“una o más capas subterráneas de estratos geológico que tiene suficiente porosidad y permeabilidad que para permitir un flujo de cantidades utilizables de aguas subterráneas o la extracción de cantidades utilizables de aguas subterráneas”*
- ✓ Las Reglas de Seúl tratan sobre aguas subterráneas internacionales, ILA, 1986 Presentan un modelo específico para incorporar el tema de aguas subterráneas en el orden internacional con alcance para acuíferos confinados. Definió el acuífero internacional *“como las aguas de un acuífero que son interceptados por una frontera entre dos o más Estados, son aguas subterráneas internacionales y ese acuífero con sus aguas forma una cuenca internacional como parte de ella”* y señalaron que las aguas subterráneas debían estar regladas por las Reglas de Helsinki.

Según las Reglas de Helsinki, los Estados sobre una Cuenca hidrográfica donde se formen o no los acuíferos y sus aguas con las aguas superficiales, son un sistema hidráulico común.

- ✓ I Foro Mundial del Agua. Realizado en Marrakech en 1997 Allí se construyó una visión a largo plazo del agua, la vida y el medio ambiente para el siglo XXI. Tratada como un bien comerciable también se habló del saneamiento, la administración compartida del agua, la conservación de los ecosistemas, la igualdad de género y el uso eficiente y racional de las aguas.
- ✓ II Foro Mundial del Agua. La Haya, 2000. En la Declaración Ministerial se identificaron los principales retos en cuanto a satisfacción de necesidades básicas del agua; garantizar el abastecimiento de alimentos: la protección de los ecosistemas; los recursos compartidos superficiales y subterráneos, la gestión del riesgo, la valoración, el buen gobierno y prudente de las aguas.
- ✓ III Foro Mundial del Agua se celebró en Kyoto, Osaka y Shiga en el año 2003 En este evento se hizo énfasis en el rol de las aguas superficiales y subterráneas frente al desarrollo sostenible y el manejo racional de las aguas transfronterizas de las regiones africanas.

Se trataron temas respecto al agua subterránea y el manejo del riesgo hídrico, la transparencia ecológica del agua y el agua virtual. El informe de la UNESCO respecto a las aguas superficiales y subterráneas insistió sobre el acceso al agua limpia y su reconocimiento como derecho fundamental. Indicó que la falta de acceso al agua y al saneamiento son causas de la pobreza y de las enfermedades, y se convierten en obstáculos para las oportunidades y la estabilidad política.

- ✓ Aludió a la necesidad de centrarse en la gobernanza de las aguas superficiales y subterráneas, indicando que los ecosistemas sanos son esenciales en el ciclo hidrológico.



- ✓ IV Foro Mundial del Agua llevado a cabo en México en el año 2006. En el marco del evento se aprobó un plan de acción encaminado a dar respuesta al reto global sobre el agua, el crecimiento y el desarrollo, la gestión integrada de los recursos hídricos; el suministro del agua y el acceso universal a los servicios sanitarios; la gestión del agua para la alimentación y para el medio ambiente además del manejo de riesgo.
  
- ✓ V Foro Mundial del Agua se realizó en Ankara – Turquía en el año 2009. Se trató sobre Turquía sobre la justicia del agua; el enfoque interdisciplinario en la interrelación de asuntos hídricos.
  
- ✓ Se analizaron los cambios globales, la educación, el desarrollo de capacidades y el apoyo financiero. No se puede aplicar ningún enfoque universal en cuanto al manejo de las aguas superficiales y subterráneas; la necesidad de fortalecer procesos participativos en la estrategia del desarrollo de los recursos hídricos.
  
- ✓ Conferencia Internacional sobre Aguas Subterráneas, Se celebró en Dindigee, India en el año 2006. Se abordó la evaluación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, los procesos de recarga y descarga artificial de las aguas subterráneas; los modelos de aplicación en rocas duras y blandas, el agua y el medio ambiente y los aspectos de la gestión conjunta de los recursos hídricos subterráneos.
  
- ✓ Conferencia Internacional Sobre Incentivos Económicos y Gestión de la Demanda de Agua. Se llevó a cabo en Mascate, en el Sultanato de Omán en el año 2006. Se trató sobre las experiencias del mercado del agua, la evaluación económica de los trasvases entre países, los vertimientos de aguas usadas en la producción de petróleo en los sistemas acuífero transfronterizos.

- ✓ Conferencia Internacional de Aguas Subterráneas y Reducción de la Pobreza en África. Se llevó a cabo en Londres, Reino Unido, año 2005. Se trató sobre la necesidad de identificar los desafíos técnicos para la prospección y gestión de aguas subterráneas.
- ✓ Sexto Informe del Relator Especial de la Comisión de Derecho Internacional. Precisó que todos los estanques, lagos y caudales, situados en la superficie se denominan aguas superficiales.

Agregó que las aguas de infiltración son llamadas “aguas capilares”, y que éstas regresan a la atmósfera a través de la evapotranspiración. El agua infiltrada que no es retenida en el suelo sigue su escurrimiento a través de poros y grietas, por lo cual se denomina agua gravitacional.

Cuando las aguas gravitacionales llegan a una capa impermeable y se acumula llenando completamente todas las grietas, poros o espacios por encima de esa capa impermeable, al agua que así se acumula es la que se denomina el agua subterránea y el nivel superior se le conoce como el nivel hidroestático o hidrostático.

- ✓ VI Congreso de la Asociación de Recursos Hídricos Internacionales realizado en la ciudad de Ottawa, Canadá dio lugar al Anteproyecto para el Tratado de Bellagio en 1989. El Proyecto Bellagio propiciaba la creación de una comisión conjunta transfronteriza para promover el uso racional de las aguas.
- ✓ Atenas - 1979 ILA – Introduce el Principio de precaución que reza, “*cuando haya peligro de un daño grave e irreparable, la falta de certeza científica absoluta no deberá aducirse como razón para aplazar la adopción de medidas destinadas a impedir la degradación del medio ambiente*”. (PNUMA - OMM, 2015) También incorporó el Principio de la Evaluación internacional del Impacto Ambiental, el Principio de la autorización previa, el criterio del daño transfronterizo, el concepto de daño sensible y el Principio de equidad.

✓ Conferencia Internacional Sobre el Agua y Medio Ambiente (Dublín, 1992). La declaración que se produjo de esta conferencia dispuso que el agua es un Derecho y no una mercancía.

Para consolidarlo estableció entre otros principios los siguientes:

1.- El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para la vida, para el desarrollo y para el medio ambiente,

2.-El desarrollo y gestión del agua debe basarse en un enfoque participativo involucrando a los usuarios, planificadores y tomadores de decisión a todos los niveles, tomando las decisiones al nivel más bajo posible que sea adecuado,

3.- La mujer juega un papel central en la provisión, gestión y salvaguardia del agua,

4.- El agua tiene un valor económico en todos sus usos competitivos y debe ser reconocida como un bien económico.

Otros antecedentes internacionales sobre las aguas subterráneas se encuentra en instrumentos como la normativa europea donde está la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000. El Parlamento Europeo y el Consejo también sancionaron la Directiva 2006/118/CE de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.

## **8.2. Regional.**

Se encuentra dentro los antecedentes regionales, aquellos que tienen que ver con los Planes de Ordenamiento Ambiental de Cuencas promovidos por la Corporación Autónoma Regional de Caldas, sin contar con avances significativos en la prospección territorial de aguas subterráneas.

Existen investigaciones académicas sobre la cuenca del Río La Miel, al igual que sobre los impactos que el túnel de la PCH El Edén generó en los ecosistemas intervenidos. Pero dicha investigación no ha tenido el despliegue que le permita a los lugareños conocer la realidad técnica del desabastecimiento sobreviniente en el corregimiento de Bolivia – Caldas.

### 8.2.1. Grupos de estudio de Hidrogeología en Colombia.

Como parte importante de la revisión de antecedentes se identificaron los grupos de investigación que desarrollan proyectos de investigación en el área de eco-hidrología, los cuales se citan a continuación:

Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Instituto de Estudios Ambientales IDEA.  
Aplicación HIDROVISOR - ASVAMM.

### 8.2.2. Temáticas más abordadas en la investigación de la Hidrogeología.

Los artículos e informes revisados para esta monografía se presentan en la siguiente tabla:

Temas	Frecuencia	
	Número de estudios encontrados	Porcentaje
Escorrentía- Interceptación-Precipitación	6	8,85%
Restauración y Conservación	4	5,9%
Desertificación	8	11,76%
Balance Hídrico	7	10,29%
Infiltración- Evapotranspiración	10	14,7%
Manejo integral de Cuencas hidrográficas	12	17,64%
Escasez	3	4,4%
Producción de energía	11	16,17%
Pequeñas Centrales Hidroeléctricas	7	10,29%
Total	68	100%

Tabla 8 Estudios sobre hidrogeología en Colombia - Fuente: Bibliografía consultada

## 9. El ciclo hidrológico y las acciones antrópicas

### 9.1. Subsistemas del ciclo hidrológico

Distintas variables componen los procesos del ciclo hidrológico, que en cada paso van produciendo transformaciones en los ecosistemas a partir del movimiento del agua además de los cambios en sus propiedades físico-químicas y biológicas.

Ese ciclo tiene tres subsistemas, (AQUABOOK, 2017) cada uno está relacionado con la capacidad de residencia del agua durante un espacio de tiempo. En el subsistema atmosférico es abastecido por la evaporación, y en ese estado el agua reside en la atmósfera hasta que los niveles de condensación ceden a la gravedad.

El subsistema del agua en superficie se provee con las precipitaciones, y antecede esta condición la percolación que se agrega y dinamiza el subsistema de agua subterránea. Desde el suelo, el agua vuelve a la atmósfera nuevamente por evaporación a través de las plantas que la absorben para extraer nutrientes, o por fenómenos naturales asociados a la temperatura ambiente.

En esta dinámica resulta propio hablar que este flujo es diferente del concepto “*flujo de retorno*”, entendido éste como el volumen de agua que se devuelve a la red de drenaje de la cuenca como remanente del líquido aprovechado en las actividades económicas y en el consumo diario.

Con esa claridad conceptual, puede agregarse que en el ordenamiento del territorio, la cuenca hidrográfica es un referente importante para la definición de los usos del suelo, porque a partir de su concepto es posible cuantificar el agua presente en este espacio, mediante una modelación del ciclo hidrológico y la obtención del balance hídrico en un momento dado (Sergio Fattorelli, 2011).

El balance hídrico permite determinar la oferta hidrológica así como detectar niveles de amenaza de escasez en su provisión a través de la ecuación de continuidad, que tiene en cuenta las entradas y salidas del agua en cada subsistema. (IDEAM, Noviembre, 2013)

La equivalencia entre aportes que entran por una unidad hidrológica y la cantidad que se evapora, las variaciones en el tiempo de residencia, permite determinar la disponibilidad de agua en áreas de conservación. Los factores del balance hídrico corresponden a precipitación, evapotranspiración real, variación de humedad del suelo y variación de humedad vegetal por intercepción, la discrepancia que recoge errores sistemáticos y la escorrentía que es el fluido superficial del agua. (IDEAM, Noviembre, 2013)

La Ecuación Balance Hídrico =EBH en equilibrio (*IDEAM, Noviembre, 2013*)

$$P - \text{Esc}_{(\text{sup})} - \text{ETR} \pm \text{Der} = 0$$

P= Precipitación

ESC<sub>(sup)</sub>= Escorrentía

ETR = Evapotranspiración Real

Der= Termino Residual de Discrepancia. (Precipitación, caudal y evapotranspiración)

El caudal ambiental en equilibrio es aquel volumen de agua requerido en condiciones de calidad, cantidad, residencia y estacionalidad para garantizar la preservación y supervivencia de los ecosistemas acuáticos mientras se desarrollan las actividades socioeconómicas de las comunidades localizadas aguas abajo. (*Reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, en cuanto a usos del agua y residuos líquidos , 2010*)

## 9.2. Hidrogeología: El tejido subterráneo entre el suelo y el agua

Al hacer referencia a las condiciones de calidad alude a parámetros y condiciones que garantizan la salud de los ecosistemas, más que la aptitud para los usos. Se refiere al índice de calidad del agua.

Pero el asunto de interés de esta investigación se centra en la escasez de agua sobreviniente en un lugar del departamento de Caldas donde el problema se presentó a partir de la construcción de un túnel de desvío de las aguas desde un cauce principal para llevarlas a un tanque desde el cual se provee la caída hidráulica para mover el generador de electricidad.

En el entendido que las aguas de nacimiento se proveen en forma natural por el movimiento de las aguas desde el subsuelo hacia la superficie, el corte del subsuelo causado por la construcción del túnel destruye el continuum de la estructura subterránea que facilitaba esa intercomunicación capilar. Por lo tanto, el ciclo del agua deja de funcionar en la zona intervenido por causa de la lesión ocasionada.

El agua en el subsuelo se mueve muy lentamente y lo hace primordialmente en forma lateral, pero hay fuerzas en la naturaleza como la presión atmosférica, la fuerza de gravedad, el ciclo del agua y el clima entre otros, además de propiedades físico – químicas como la capilaridad que distorsionan ese movimiento dando lugar a movimientos de tipo descendente y ascendente.

En este sentido resulta útil el uso de la curva hipsométrica, mediante la cual puede representarse en un plano cartesiano, las altitudes que se presentan en la cuenca, ubicadas a partir de las superficies de la salida en la abscisa. (*Agustín Felipe Breña Puyol, 10 enero 2006*) lo que da como resultado un gráfico que representa el perfil de la cuenca y su morfología, de donde

interesa los puntos de afloramiento en diagramas de altitud e intervalos de frecuencia.

La infiltración tiene papel fundamental en el ciclo hidrológico desde su relación entre la cantidad de agua precipitada, Vs la cantidad escurrida y la cantidad infiltrada. De aquí puede estimarse la cantidad acumulada de agua infiltrada y la tasa de infiltración, para lo cual se aplica la ecuación de Horton. (Badillo & Rodríguez, 2004)

$$f(t) = f_b + (f_o - f_b)e^{-kt}$$

$$F(t) = f_b t + \frac{f_o + f_b}{k} (1 - e^{-kt})$$

*f<sub>b</sub>*: Tasa base de infiltración (capacidad mínima de infiltración),

*f<sub>o</sub>*: Tasa inicial de infiltración y

*k*: Parámetro de forma.

Por su parte, la evapotranspiración depende de la radiación solar, de la temperatura, del viento, de la humedad del suelo, de la humedad ambiente, de la salinidad del agua, del tipo de cobertura vegetal, y se produce por el cambio de estado del agua líquida a vapor.

La evaporación que asciende a la atmósfera inicia en la superficie terrestre y sobre el espejo de los cuerpos de agua, acumulándose a la transpiración de las plantas y organismos vivos. El vapor atmosférico se condensa hasta tomar las condiciones en las cuales retorna a la tierra o las aguas mediante precipitación en forma líquida o sólida. (AQUABOOK, 2017)

En conjunto, la articulación de todos estos elementos muestra una fuerte interrelación e interdependencia de la vida y la atmósfera, sustentada en los suelos (en la superficie y en el



subsuelo) como plataforma de soporte, a través del ciclo del agua, como si ésta fuera el indicador principal de la salud integral del territorio y sus ecosistemas.

De ello, que la intervención de la plataforma que sustenta o soporta la vida, mediante la introducción de una oquedad lineal continua, configura un alto riesgo de intervenir, interferir y destruir los depósitos de aguas subterráneas, en especial los acuíferos confinados donde se dan las diferencias de presión suficientes y necesarias para impulsar un flujo capilar ascendente capaz de alimentar en forma continua uno o varios manantiales.

Así que tras el análisis realizado a lo largo de esta monografía, se confirma que existe una estrecha vinculación entre los túneles perforados para desviar caudales de aguas desde los cauces hacia el tanque de recarga de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas y el ciclo del agua.

Que los efectos de esa vinculación se presentan en la reducción de la cantidad de agua que aflora en los nacimientos y que dicha afectación puede conllevar hasta la desaparición de manantiales cuando el túnel a su paso atraviesa o toca acuíferos.

### **9.3. La Pequeña Central Hidroeléctrica El Edén y su Licencia Ambiental. Un proyecto ejecutado**

Proyecto licenciado mediante Resolución 173 del 4 de mayo de 2011 dentro del expediente 1416 tramitado ante la Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS- Declarado de utilidad pública mediante resolución 236 de agosto 12 del año 2013.

Ser de utilidad pública significa que los dueños del proyecto pueden tramitar expropiación de los predios que se requiera para su ejecución. El proyecto demandó un área aproximada de 23,95 hectáreas, distribuidas en 10 polígonos donde se ejecutaron las obras de captación y carga

hidráulica, los terrenos para la ubicación de la casa de máquinas, los depósitos, las vías, las obras para la descarga y la línea de transmisión eléctrica.

La solicitud de licencia ambiental para la Pequeña Central Hidroeléctrica El Edén se formuló ante la Corporación Autónoma Regional de Caldas, para una capacidad instalada 19,6 Mw. Localizada en Bolivia – Caldas. (Fuente: (LATINCO, 2017). Según la licencia otorgada, la empresa podía captar 17 litros por segundo como caudal máximo a desviar por los túneles, sin embargo la infiltración que se halló llegó hasta los 70.

Los impactos en la zona, se derivan de las infraestructuras establecidas.



Fuente: (LATINCO, 2017)

Se localiza en la margen izquierda del río La Miel, en la base de la formación montañosa en cuyo parte-aguas se encuentra el corregimiento de Bolivia – Caldas. El impacto en este punto se causa por la reducción del caudal disponible en el cauce. La concesión de la cantidad de agua a desviar se otorgó en metros cúbicos y no en porcentaje del caudal en circulación.

Las implicaciones de entregar el uso en estas unidades serán visibles en época de estiaje cuando el descenso de la masa de agua en circulación puede llegar a afectarse el caudal ecológico, entendido éste como el necesario para preservar las funciones del ecosistema acuático.



Fuente: (LATINCO, 2017)



Fuente: (LATINCO, 2017)



Fuente: (LATINCO, 2017)



Fuente: (LATINCO, 2017)

Para conducir el agua desviada del río La Miel, se perforó la montaña en un trayecto aproximado de 6,0 kilómetros, con un túnel diseñado con una sección en baúl de 1.6 m de altura medida de la base a los hastiales, y desde allí un radio de bóveda de 1,6 m.

El túnel pasa perpendicular a las fallas y formaciones geológicas propias de la zona, donde se encuentran principalmente rocas meta-volcánicas y metamórficas del grupo Cajamarca considerado sistema acuífero debido al gran fracturamiento del macizo agregado a la porosidad secundaria de las rocas que admiten dinámicas de fluido y almacenamiento subterráneo de aguas. (Quiroga, Julio, 2016)



Fuente: (LATINCO, 2017)

La línea de corte del túnel desplazó 54500 metros cúbicos de suelo, a la vez que lesionó el acuífero que alimentaba los nacimientos que aprovechaban las comunidades de la zona rural.

La siguiente imagen muestra el punto donde se ubica el portal de salida; allí termina el túnel y el tubo se conecta al tanque de carga. El sitio está bordeado por nuevas vías.



Fuente: (LATINCO, 2017)

Es la última etapa de la PCH El Edén, donde el agua turbinada se devuelve al cauce.



Fuente: Galería de imágenes. (LATINCO, 2017)

Además de las afectaciones en los acuíferos a nivel de subsuelo, que se reflejaron en la reducción y la desaparición de nacimientos de agua a nivel de superficie, el desvío de las aguas, redujo el caudal sobre el cauce.

El estudio de impacto ambiental, no concebía un inventario de la oferta hidrológica aprovechada por las comunidades de la zona de influencia del proyecto.

Los detalles de variación de la oferta hídrica mediante la aplicación de Balance Hídrico en la cuenca la Miel que se muestra en la Tabla 9 indica que en el Caso de la Pequeña Central Hidroeléctrica El Edén – Bolivia – Caldas, donde las comunidades rurales informan sobre la desaparición de la oferta de agua de nacimientos en las veredas La Soledad y La Costa.

La correlación entre ambas fuentes de información hace que sea altamente probable que dicho impacto en el ecosistema provenga de las intervenciones de perforación del túnel, en especial hacia el tramo de salida, donde se presentó el desbalance para la Quebrada La Balastrea, con lo cual se estaría confirmando la asociación entre el túnel de desvío y la escasez de agua en la zona rural del corregimiento de Bolivia. .

Cuenca Río La Miel				
Corriente	Zona de Balance	Estacionario		
		Flujo de Aporte del Cauce al Acuífero	Flujo de Aporte del Acuífero al Cauce	Balance de Aportaciones
		(m3/día)	(m3/día)	(m3/día)
R. La Miel	Zona 10	0.4200	2175	2174.580
Q. El Aguacate	Zona 12	0.8162	27.823	27.007
Q. El Filón	Zona 13	0.0330	29.532	29.499
Q. El Aguila	Zona 15	0	30.808	30.808
Q. Bolivia	Zona 21	0	7.634	7.634
Q. La Bomba	Zona 22	0.0033	3.283	3.279
Q. La Primavera 3	Zona 27	0.0018	1.015	1.013
Q. Patio Bonito	Zona 23	0.0825	6.091	6.008
Q. La Esmeralda	Zona 25	0.0102	0.120	0.109
Q. El Jardin	Zona 29	0.0003	0.709	0.709
Q. El Guadual	Zona 30	0.0030	1.022	1.019
Q. La Chonta	Zona 34	0	4.075	4.075
Q. La paterana	Zona 33	0.1080	26.204	26.096
Q. Alegría	Zona 39	0.3600	53.006	52.646
Q. El Diamante	Zona 40	0.0250	32.771	32.746
Q. El Recreo	Zona 41	0.0081	26.010	26.002
Q. La Siria	Zona 43	0	7.087	7.087
Q. La Balstrera	Zona 45	0	28.985	28.985
Q. El Alto	Zona 46	0	2.232	2.232
Q. El Higuérón	Zona 44	0.0124	8.929	8.916

Tabla 9 - Balance hídrico Cuenca Río La Miel Fuente: (Quiroga, Julio, 2016)

#### **9.4. La Pequeña Central Hidroeléctrica de Montebonito y su Licencia Ambiental. Un proyecto en proceso.**

Proyecto licenciado mediante Resolución 060 del 17 de febrero de 2011 fue tramitado ante la Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS- organismo que dio viabilidad al proyecto siguiendo las recomendaciones del Informe Técnico 024 de febrero de 2011 expedido por la Subdirección de Recursos Naturales.

De acuerdo con esas recomendaciones, se concesionó la captación de las aguas del río Guarinó en tres sitios, para extraer un caudal de 14254,34 l/s de los cuales 14250 l/s se utilizarían para la generación, 0,84 l/s para uso doméstico en los campamentos, 2,8 l/s para uso industrial en las plantas de triturado y concreto, talleres, vehículos, maquinaria y equipos, y 0,7l/s para humectar las vías.

Según el documento presentado para la modificación de la licencia ambiental, el caudal mínimo medido en el sitio de captación es de 3,06 m<sup>3</sup>/s, (*Hidroeléctrica, octubre 2015*) esto traducido en litros corresponde a 3060 l/s. Un balance de oferta muestra la desproporción de la concesión otorgada para 14254,34 l/s, que en m<sup>3</sup> serían 14,3. Un exceso que supera los 11 m<sup>3</sup> del caudal mínimo en el cauce afectado.

En octubre del año 2015 se solicitó modificación de la resolución 060 de 2011, con el fin de hacer ajustes en los siguientes aspectos:

- Aclaración del Área de Influencia Directa otorgada en la Licencia Ambiental.
- Definición de nuevos puntos de concesión y de vertimiento de aguas.
- La inclusión y precisión de puntos de ocupación de cauce
- La utilización de nuevas zonas de depósito de materiales en el corregimiento de Aguabonita en el municipio de Manzanares-Caldas.
- Relocalización de los talleres y de las plantas de trituración y concreto en la zona de Descarga.
- Reubicación de los campamentos en el frente de Captación y Descarga.
- Aclaración de los tramos de las nuevas vías a construir y para rehabilitar.
- Ajustes del caudal ecológico según la actualización de la información hidrológica y el cálculo del caudal de garantía ambiental.



- La modificación de algunos indicadores señalados en las fichas del Plan de Manejo Ambiental.
- La inclusión de un programa en el Plan de Monitoreo y Seguimiento para la arqueología preventiva y Programa de Rescate de Fauna Acuática del río Guarinó.

Aún con estas modificaciones, el documento señala que de repetirse aquel caudal mínimo histórico estando en operación la central, los cálculos hidráulicos combinando el azud de captación y el orificio de captación de la escalera de peces, alcanzarían una captación de 750 l/s y de 3.010 l/s en la rejilla del azud.

Entre los dos sitios captarían 3760 l/s, que en metros cúbicos serían 3,76 m<sup>3</sup> frente a un caudal de estío de 3,06 m<sup>3</sup>/s, que arrojaría un déficit de 0,7 m<sup>3</sup>/s que significa afectación del caudal ecológico en la ronda hídrica.

El proyecto contiene dentro de sus diseños un túnel de conducción a flujo libre de 5562 metros de largo, sección en herradura de 3,5 m de ancho por 3,5 m de altura, (12,25 m<sup>2</sup> aproximado), con una longitud total de 5.562 metros, que implicaría remover un poco más de 68.000 m<sup>3</sup> de suelo subterráneo.



Fuente: (Hidroeléctrica, octubre 2015)



El perfil del trazado es el siguiente:



Fuente: (Hidroeléctrica, octubre 2015)

En materia de hidrogeología, descripción de depósitos de aguas subterráneas e inventarios de afloramientos o nacimientos de agua que abastecen comunidades rurales en la zona afectada con el trazado del túnel, el estudio y documentos aportados a la autoridad ambiental para el otorgamiento de licencia son inexistentes y la información que se aporta se limitan a describir la tipología de suelos a excavar y la posibilidad de hallar evidencias de la falla de Palestina:

*“Túnel: El túnel será excavado en cuarcitas con intercalaciones de esquistos, que presentan una orientación en sentido noreste, tal como las estructuras regionales, en general la roca es competente, masiva y de buenas características geotécnicas. Es de esperar la presencia de alguna falla satélite de la zona de falla Palestina, durante construcción.”* (Hidroeléctrica, octubre 2015)

A pesar de las debilidades del estudio, la Resolución que otorga la Licencia Ambiental y las acciones ante la comunidad que propone el dueño del proyecto, centran su esfuerzo en realizar socialización con los habitantes del territorio impactado con el proyecto.

La infraestructura correspondiente al azud, se planea establecer en la margen izquierda del río Guarinó, con ancho de 2,0 m y altura de 0.50 m, con una cota inferior a 1.856.03 m con lo que se pretende garantizar el abastecimiento de agua en el canal de peces en un volumen de 450 l/s antes de la captación.

El túnel de conducción se plantea de una longitud de 5562 m, y sección en herradura de 12,25 m<sup>2</sup> (3,5 m de alto por 3,5 m de ancho), de donde se desplazaría 68134,5 m<sup>3</sup> de subsuelo, sin descartar efectos en la oferta de aguas subterráneas.

El Tanque, Tubería y Pozo de carga se localizan al final del túnel de conducción. El tanque de carga se diseñó en concreto reforzado con las siguientes especificaciones: 7 m de profundidad, 6 m de ancho y 12 m de longitud, para una capacidad de almacenamiento de 504 m<sup>3</sup> por segundo.

El proyecto cuya licencia ambiental fue aprobada mediante resolución 060 de 2011, también generará impactos en la superficie en infraestructura como las vías que el mismo plantea construir en el frente de captación en el puente sobre el río Perrillo, vía se iría hasta la vereda La Suecia en el municipio de Marulanda en un tramo de 9 kilómetros de los cuales 200 m son nuevas construcciones.

En la zona del portal de salida y la casa de máquinas plantea rehabilitar la vía que empieza en la vereda Campoalegre hasta Aguabonita, en un tramo de 5 kilómetros y des aquí hasta la vereda La Cristalina en 4,6 kilómetros más para un total de 9,6 km. Adicional a ésta se construirían 296 metros de vía en la plataforma del pozo de carga.

Los escombros o material de excavación serían depositados en nuevas escombreras, seleccionadas por el proyecto antes que por la administración municipal, que tiene la competencia para establecer los usos del suelo y la ubicación de escombreras. (Sociedad Central Hidroeléctrica Montebonito, 2015)

### **9.5. Los Impactos Ambientales de las PCH**

En el caso de la PCH Montebonito, la licencia se tramitó ante la Corporación Autónoma

Regional de Caldas, porque se espera una capacidad de generación inferior a los 30 Mw. El proyecto ha previsto una intervención sobre el río Guarinó con infraestructuras sobre las cuales la experiencia que se tuvo con la Central Hidroeléctrica el Edén, necesariamente generan impactos ambientales y tratándose de infraestructura subterránea, estos son irreversibles.

En ambos proyectos se hace evidente la debilidad de los estudios de impactos ambientales en materia de hidrogeología, que en el caso del Edén se visualizó cuando desaparecieron las fuentes de abastecimiento de agua de las que se servían las comunidades rurales. El daño ambiental así percibido condujo a señalar como causal de dicho desabastecimiento, las obras correspondientes a los cortes del túnel de conducción.

Otros impactos asociados con las centrales hidroeléctricas es la generación de un tramo seco que se ubica entre el azud o zona de captación hasta el punto donde se devuelven las aguas turbinadas. En este tramo se dan primordialmente dos tipos de impacto:

Una primera evidencia de la afectación al equilibrio ambiental se registra en las épocas de estío o caudal mínimo, cuando la cantidad de agua que demanda la operación de la generadora supera el caudal ofertado por la fuente. Una segunda afectación de la reducción del caudal se registra en la reducción de la fauna acuática, de lo cual existe conciencia en los concesionarios, cuando dentro del plan de manejo se propone un programa de manejo de rescate de fauna acuática.

#### **9.6. Caracterización hidrogeológica de los suelos en la zona intervenida con los túneles de las PCH El Edén y Montenbonito.**

El oriente del departamento de Caldas, se localiza sobre la formación Cajamarca. La cuenca del río Magdalena se conforma por un sistema de rocas que datan del precámbrico, que subyacen

a depósitos sin consolidar de la época cuaternaria. Concentra diversidad de rocas entre ígneas, metamórficas y sedimentarias, incluyendo depósitos glaciares y fluvioglaciares. (IDEAM - CORMAGDALENA, Noviembre, 2001)

Al predominar depósitos inconsolidados del cuaternario y glaciares, se ha favorecido la formación de acuíferos, que en la zona aún carecen de un estudio detallado que los identifique y permita realizar un inventario de los mismos.

Al carecer de esta identificación de la oferta de aguas subterráneas en la cuenca del río Magdalena, son inciertos los impactos que pueden ocasionar las excavaciones de túneles, respecto de los depósitos acuíferos. Trabajos de investigación recientes, han acudido a la modelación hidrogeológica como alternativa para valorar el impacto del túnel en la oferta hídrica de la zona de estudio específica:

*“Por medio del modelo hidrogeológico y la simulación de distintos escenarios en régimen permanente y transitorio, se busca cuantificar y evaluar los posibles efectos sobre las formaciones acuíferas localizadas en la zona intervenida por el túnel y al balance hídrico en general, además de valorar las medidas de mitigación implementadas durante la ejecución del proyecto, en lo referente a su capacidad de atenuación y minimización de los impactos identificados”.* (Quiroga, Julio, 2016)

De este trabajo de investigación surgió como resultado que la excavación del túnel de la PCH El Edén, *“afecta en mayor medida a la unidad acuífera correspondiente a los esquistos fracturados del grupo Cajamarca”*, (Quiroga, Julio, 2016) y que ello sucede de forma descendente progresiva los niveles piezométricos en las quebradas La Esmeralda y La Primavera III a lo que no son ajenas otras fuentes de abastecimiento debido a una *“alta vulnerabilidad intrínseca de los*

*manantiales*” (Quiroga, Julio, 2016), que puede conllevar hasta el secado de los mismos debido a la pérdida de la conexión hidráulica subsuelo – superficie.

En otras palabras, hay una disminución del flujo subterráneo, que no se presenta de forma inmediata, por la virtud del lento movimiento de las aguas subterráneas, y es probable que en el tiempo se vea comprometida su disponibilidad para la comunidad del lugar.

En consecuencia es de esperarse, que en caso de llevarse a cabo la ejecución de la Pequeña Central Hidroeléctrica de Montebonito, con base en los estudios donde la caracterización de los suelos es precaria, las consecuencias esperadas tendrán que ver con un futuro desabastecimiento de los suelos por donde se establezca el corte del trazado correspondiente al túnel de conducción.

## **10. Marco Legal.**

La ley 23 del año 1973 otorgó facultades al Presidente de la República para que expidiera el Código de Recursos Naturales y de protección al medio ambiente, entendiéndose que éste la constituyen la atmósfera y los recursos naturales renovables. Que el mismo es patrimonio común, cuyo mejoramiento y conservación son actividades de utilidad pública.

Atendiendo a estas facultades el 18 de diciembre del año 1974 el Gobierno Nacional expidió el Decreto 2811, conocido también como Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, mediante el cual se entró a reglar entre otros temas los relacionados en el agua en cualquiera de sus estados, la tierra, el suelo y el subsuelo.

La parte III del CRNR en los Capítulos 1 y 2 del Título I, contiene la reglamentación para el aprovechamiento de las aguas en todos sus estados y fuentes que incluye las subterráneas.

El título VII del mismo código de recursos naturales, considera en el artículo 149 que se entiende por aguas subterráneas, las subálveas y las ocultas bajo la superficie del suelo o del fondo marino que brotan en forma natural, se captan en el sitio de afloramiento, o para su obtención se necesitan obras como pozos o galerías filtrantes.

El Decreto 1541 de julio 28 de 1978 versa sobre las aguas no marítimas, en su capítulo II del Título VII regula las aguas subterráneas en cuanto a labores de exploración, aprovechamiento, preservación y control. Este decreto fue modificado parcialmente por el Decreto 2858 de octubre 13 de 1989.

Decreto 155 de 2004, expedido en enero 22, versa sobre las tasas de uso de las aguas, entre ellas las de fuente subterránea.

Con el Decreto 1323 de abril 19 de 2007 crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico. Complementario con el mismo, se expide el Decreto 1324 en abril 19 de 2007 mediante el cual se establece el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico, y la priorización para el ordenamiento e intervención de las cuencas hidrográficas, fue regulada por el Decreto 1480 expedido el 4 de mayo de 2007. (Cardona, 2010)

## **11. Metodología.**

### **11.1 Tipo de Investigación.**

El tipo de investigación es descriptiva y analítica de información documental revisada.

### **11.2 Población.**

No se requiere muestra poblacional pero se consultaron libros, artículos, informes y publicaciones con bases científicas.

### **11.3 Selección de documentos.**

Recopilación e investigación de artículos científicos, tesis académicas, de investigación e informes técnicos halladas por palabras clave como túneles, percolación, Ley de Darcy, Mecánica de fluidos, fuerza hidráulica, regulación hídrica, infiltración, flujo ascendente en aguas de pozos. Se utilizaron un límite mínimo de 65 fuentes bibliográficas.

### **11.4. Análisis de documentos.**

Mediante fichas bibliográficas se elaboró una síntesis de datos cualitativos y cuantitativos así como los resultados más relevantes para la investigación. Se realizó una clasificación de documentos por temáticas como: escorrentía, evapotranspiración, regulación hídrica, balance hídrico, calidad del agua, túneles de desvío, azud y restauración de suelos excavados, entre otras. Se descartaron documentos en los que se aborda la temática del agua en forma muy generalizada, o que no eran representativos en materia cualitativa y cuantitativa de acuerdo con el objeto de investigación.



## 12. Resultados

Luego de revisar los documentos arrimados ante las autoridades ambientales para cumplir con el requisito de Evaluación de Impactos Ambientales y que dieron lugar a licencias para dos infraestructuras de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en Caldas, el análisis de caso que se enfocó a la PCH El Edén, muestra que a la fecha de ésta monografía ya se encuentra en operación y que la PCH Montebonito no ha logrado ser ejecutada a pesar de estar licenciada desde el año 2011.

En este segundo caso, la inejecución de obras obedece a que la comunidad organizada en Veedurías se opone con fuerza a que éste proyecto de generación hidroeléctrica se ejecute. Ello debido a los antecedentes de escasez en la oferta hídrica de la cual disponían los campesinos de distintas veredas del sector de Bolivia afectados con la construcción de las obras pertenecientes a la Pequeña Central Hidroeléctrica El Edén.

El análisis de la información obtenida de esta infraestructura, mostró que para la PCH El Edén, los estudios que conllevaron el otorgamiento de la Licencia Ambiental carecían de una caracterización hidrogeológica de la zona, esto es, que al realizar la perforación del túnel de conducción se invadió las estructuras del suelo alterando su funcionalidad y con ello fuerzas físicas como la mecánica de los fluidos, que estarían explicando la desaparición de por lo menos tres afloramientos o nacimientos que abastecían la demanda de agua en varias comunidades rurales.

De acuerdo con el marco conceptual consultado, las evidencias físicas en campo y la información contenida en los estudios que condujeron al otorgamiento de licencias ambientales, puede inferirse que las variaciones físicas que se introdujeron en los suelos incidieron en sus propiedades mecánicas y con ello afectaron la dinámica de los fluidos que por el circulan.

La ausencia de una caracterización hidrológica de la zona así como de un inventario de depósitos de agua subterráneos que potencialmente serían cruzados por el túnel impidió prevenir la evaluación de uno de los impactos más graves que la perforación del túnel ocasionaría en el ecosistema suelo, como sería la afectación funcional de los depósitos acuíferos de la zona en su intercambio con la superficie.

Esta misma deficiencia se presenta con los estudios aportados para acceder al licenciamiento de la Central Hidroeléctrica Montebonito, la que en el año 2015 requirió modificación de la licencia ambiental, al quedar en evidencia que el caudal a extraer del río Guarinó, superaba el máximo disponible en época de estío.

A ello se agrega que para ésta nueva central generadora, tampoco se previó adelantar la caracterización hidrogeológica del territorio a intervenir dejando a la eventualidad las posibles afectaciones que el corte del túnel dejaría en el ecosistema. Ello es plenamente previsible dado que el estudio destinado a obtener el licenciamiento ambiental carece de un inventario de depósitos acuíferos en la zona haciendo de aquel, un instrumento todavía deficiente visto desde la responsabilidad social y ambiental por los impactos que esta infraestructura traería una vez se desarrolle.

Es concreto y cierto de acuerdo con la documentación analizada, que existen fuertes vínculos correlacionados entre la oferta de bienes y servicios ambientales para el caso del agua para abastecimiento humano, y las fuerzas físicas que determinan el movimiento del agua en el suelo y el subsuelo.

Este hallazgo es válido por los resultados del Balance Hídrico y los efectos reales detectados en el territorio, de manera que cualquier proyecto invasivo de las estructuras del subsuelo deben

tener alcance a información específica que describa la caracterización hidrogeológica de los suelos que se pretenden excavar para efecto de construir los túneles de conducción del agua desviada a través de las infraestructuras concebidas para la generación hidroeléctrica en el centro - oriente del departamento de Caldas.

La información verificada respecto al inventario de la oferta hídrica antes y después de la intervención de la PCH El Edén, se encuentra consignada en uno de los documentos descritos en la bibliografía consultada. Se trata de la investigación *Modelo Hidrogeológico Distribuido 3D desarrollado en el área de influencia del túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica el Edén, Caldas, Colombia*, desarrollado a nivel Maestría y que fue realizado en el lugar por el profesional Oscar Alexander Varila Quiroga.

En el caso del proyecto Montebonito, no existe un antes ni un después en materia de afectación de la oferta hídrica de este territorio, debido a que aquel no ha sido ejecutado, pero con la información disponible, puede prevenirse un daño irreversible en los bienes y servicios ambientales de que dispone la comunidad.

El último objetivo de esta monografía, encaminado a evidenciar y caracterizar la asociación existente entre la excavación del túnel con los impactos en el ciclo del agua, se cumple a lo largo del desarrollo de este trabajo de monografía mediante un amplio marco conceptual, donde entre otros conceptos también se explican las fuerzas mecánicas de los fluidos en el suelo, y de qué manera la interrupción de la comunicación que sobreviene entre los diversos estratos subterráneos una vez producido el corte, afecta el desempeño físico de estas fuerzas, que se hace manifiesto con el cese del fluido en los sitios de afloramiento.

Se cumple también con el objetivo general propuesto, en función de analizar la vinculación de los túneles de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas con el ciclo del agua: Estudio de Caso El Edén – Bolivia – Caldas, se desarrolla a partir de la pregunta de investigación y la hipótesis que se pretende demostrar o desvirtuar, que en esta monografía se expuso en los siguientes términos:

*¿Las infraestructuras en túnel de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas a filo de agua, afectan el ciclo del agua?*

Análisis que culmina confirmando la hipótesis que: Los túneles de las PCH afectan el ciclo del agua en la fase de evapotranspiración al interior del subsuelo, por motivo de los cortes que se introducen.

Un hallazgo importante de esta investigación, es que lo registrado para licenciar como Pequeñas Centrales Hidroeléctricas El Edén y Montebonito, en realidad no son estructuras a filo de agua sino tecnologías mixtas que constan de captaciones mediante un azud para el desvío de las aguas de una corriente hídrica natural para conducir las por un túnel hasta un tanque, tal y como se usa en las grandes centrales generadoras de energía que utilizan embalse.

Esta descripción es diferente de lo que técnicamente son las estructuras a filo de agua, las cuales aprovechan la fuerza de gravedad y la torrencialidad de los ríos para mover las aspas de los reactores que son ubicados sobre los cauces o cuerpos de agua sin realizar modificaciones en estas estructuras naturales, lo que solo requeriría licencia para ocupación de cauce.

En ese caso, si se tratara de una central “*A filo de agua*”, no se requieren túneles ni la extracción del caudal de los ríos, con lo que el equilibrio ecológico se conserva.

Estos túneles excavados sin contar con una caracterización hidrogeológica del territorio, son la causa de la desaparición de nacimientos de agua, la disminución de la oferta hídrica y modificaciones en la climatología de lugares como Bolivia en jurisdicción del municipio de Pensilvania – Caldas donde se estableció la Pequeña Central Hidroeléctrica El Edén, reiterando que esos mismos impactos en el medio natural también pueden sobrevenir en territorio de los municipios de Manzanares – Marulanda – Fresno, con motivo de la Central Hidroeléctrica Montebonito.

Finalmente, el tema de la ética ambiental es un aspecto a debatir dado que en la verificación física de las obras, se puede constatar que la infraestructura licenciada No es a Filo de Agua.

### 12.1. Documentos Seleccionados

De acuerdo con la literatura encontrada y el análisis realizado se obtuvieron los siguientes documentos.

Número de ficha	Nombre del documento	Autor
1	<i>Codificación de Cuencas Hidrográficas por el método de Otto Pfafstetter</i>	Agencia Nacional del Agua - ANA
2	<i>Principios y Fundamentos de la hidrología superficial.</i>	Agustín Felipe Breña Puyol, M. A
3	<i>Guía para la aplicación y monitoreo del monitoreo del enfoque ecosistémico.</i>	Ángela Andrade, S. A.
4	<i>Mecánica de suelos. Teoría y aplicaciones Tomo II</i>	Badillo, E. J., & Rodríguez, A. R.
5	<i>Aguas subterráneas, conocimiento y explotación.</i>	Bellino, N. O.
6	<i>Guía en Cambio Climático y Mercados de Carbono.</i>	BIC - BONCOLDEX.
7	<i>The water budget myth revisited: why hydrogeologists model.</i>	Bredehoeft, J. D.

Número de ficha	Nombre del documento	Autor
8	The conceptualization model problem—surprise. <i>Hydrology Journal</i> , (Volume 13, ).	Bredehoeft, J. D.
9	<i>El cambio climático en la región CAR.</i>	CAR CUNDINAMARCA.
10	<i>Régimen Jurídico de las aguas en Colombia.</i>	Cardona, A. H.
11	<i>Finite Difference Solution Of The Boussinesq Equation With Variable Drainable Porosity And Fractal Radiation Boundary Condition</i>	Carlos Chávez, C. F
12	<i>Qué es el ENOS?</i> <a href="http://mitos-ambientales.blogspot.com.co">http://mitos-ambientales.blogspot.com.co</a> . Obtenido	Carranza, L.
13	de ¿Existe En Colombia Normatividad Para La Planificación, Ordenación Y Manejo De Las Cuencas Hidrográficas Y Acuíferos?	Castro, O. H.
14	<i>Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones.</i>	Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M
15	<i>Climate Briefing Highlights for April 2017</i> [Película].	ClimateandSociety (Dirección).
16	<i>Proyectos Hidroeléctricos Oriente de Caldas.</i>	CORPOCALDAS.
17	<i>Plan de acción institucional 2016 -2019</i> <i>Actualización del diagnóstico ambiental de Caldas.</i>	CORPOCALDAS
18	<i>Capilaridad y tensión superficial.</i>	Cristobal Muñoz, C. A
19	<i>lafisicaparatodos.</i>	Custom Glitter Text
20	Derecho fundamental al agua, T-790/14 - expediente T- 4.440.691 (23 de Octubre de 2014).	Corte Constitucional de Colombia
21	Estudio Nacional del agua 2010.	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
22	Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos.	Consortio para el Desarrollo Sostenible de la Eco región Andina – CONDESAN (2014)
23	<i>The essential of environmental flow.</i>	International Union for Conservation of Nature and Natural Resources
24	Parámetros del modelo de infiltración de Horton obtenidos mediante el uso de un simulador de lluvia.	Weber, Juan Francisco (2014)
25	Los bosques andinos y el agua.	Conrado Tobón, (2009)

Número de ficha	Nombre del documento	Autor
26	Humedales estacionales en la cuenca baja del río Tempisque. Manejo y conservación.	Revistas ambientales 43 (2012)
27	<i>Programa de exploración de aguas subterráneas.</i>	INGEOMINAS
28	Recursos hídricos en América latina, Planificación, es la estrategia.	Guzmán Arias, Isabel (2008) Mario A. Díaz-Granados Ortiz, Juan D.
29	Páramos: Hidrosistemas Sensibles.	Navarrete González, Tatiana Suárez López.
30	<i>El principio de Arquímedes explicado con su fórmula, historia de su experimentación e información referente.</i>	Krassik, M
31	Vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante SIG.	Gaspari, Fernanda J.; Rodríguez Vagaría, A.M.; Delgado, M.I.; Senisterra, G.E.; Denegrí, G.A.
32	Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná.	Olga Lucía Ocampo, Jorge Julián Vélez
33	Análisis de los valores de la escurrentía superficial, bajo diferentes usos del suelo en la zona alta de la cuenca del Río Chinchiná.	Nelson López Hincapié, Jairo Eduardo Pinzón Muñoz
34	<i>La hidrogeología como tecnología de apoyo en la ingeniería civil.</i>	Instituto Tecnológico Geominero de España
35	<i>Campo de aplicación de la Geología: recursos naturales geológicos y medio ambiente.</i>	INSUGEO
36	<i>The essential of environmental flow.</i>	International Union for Conservation of Nature and Natural Resources
37	Distribución del agua en el planeta. <i>Cultura del Agua - Junta Municipal de Agua Potable y</i>	JUMAPAM. (27 de enero de 2017).

Número de ficha	Nombre del documento	Autor
	<i>Alcantarillado de Mazatlan</i> , pág. <a href="http://jumapam.gob.mx">http://jumapam.gob.mx</a> .	
38	Estudio nacional del Agua 2015.	IDEAM (2015)
39	Estudio nacional del agua 2013.	IDEAM (2013)
40	<i>Recordando algunos conceptos relativos al agua en movimiento, al agua quieta y a Terzaghi.</i>	Ortuño, L.
41	<i>Metodos para determinar la recarga en acuíferos.</i>	Otálvaro, M. V., & Ariza, L. M
42	Dinámica del agua en andisoles bajo condiciones de ladera.	Edgar Hincapié Gómez y Conrado Tobón Marín. (2012)
43	Caracterización de las propiedades hidrofísicas de los andisoles en condiciones de laderas.	Edgar Hincapié Gómez, Conrado Tobón Marín (2010)
44	<i>Cambio Climático 2014 - Informe de Síntesis .</i>	PNUMA - OMM
45	<i>Enfoque por Ecosistemas - Convenio sobre Diversidad Biológica</i>	PNUMA - UN
46	Interceptación de la precipitación por la vegetación.	Conrado Tobón Marín
47	<i>Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia</i>	IDEAM
48	Capacidad de interceptación de la niebla por la vegetación de los Páramos Andinos.	Tobón, Conrado; Girleza Gil Morales, Eydith (2007)
49	Distribución del agua lluvia en tres bosques alto andinos de la cordillera central de Antioquia, Colombia.	Juan Diego León Peláez; María Isabel González Hernández y Juan Fernando Gallardo Lancho (2010)
50	Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca.	Valentina Marín Valencia (2010)
51	Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia.	Sedano-Cruz, Karime; Carvajal-Escobar, Yesid; Ávila Díaz, Álvaro Javier. (2013)
52	Coste de oportunidad. En B. d. Pérez, <i>Introducción a la Microeconomía</i>	León, J. E.



Número de ficha	Nombre del documento	Autor
53	Unidad 3. Leyes de Newton. Capítulo 8. Hidrostática. Vasos Comunicantes.	Luz, M. R.
54	<i>Plantas sin corazón... pero con xilema, floema y nociones de Física.</i>	Manus, P. M
55	<i>Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos.</i>	MINAMBIENTE.
56	<i>Red Nacional de Aguas Subterráneas - Taller sobre Planes de Manejo de Aguas Subterráneas.</i>	Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
57	<i>Teoría del Todo: Todas las Fuerzas de la Naturaleza [Película].</i>	MinutoDeFisica
58	<i>Cohesión, adhesión, tensión superficial y capilaridad.</i>	Morales., J. A.
59	Las aguas subterráneas en la dimensión internacional. Notas jurídicas sobre el acuífero guaraní.	Solar, N. G
60	La hidrósfera y el balance hídrico en la tierra.	Soto, M

Tabla 10. Documentos seleccionados. Fuente: Esta investigación

### 13. Conclusiones

Si se retoma la hipótesis planteada en la presente monografía, que endilga al túnel excavado para desviar los cuerpos de agua hacia un tanque en la tecnología empleada para desarrollar una pequeña central hidroeléctrica a filo de agua, como el hecho causal de la desaparición de nacimientos de agua, la disminución de la oferta hídrica y modificaciones en la climatología en el corregimiento de Bolivia en jurisdicción del municipio de Pensilvania – Caldas, los hallazgos terminan confirmando que se faltó al Principio de Precaución y el Principio de Responsabilidad intergeneracional.

El territorio que se intervino con el fin de establecer la Pequeña Central Hidroeléctrica El Edén resultó afectado en la oferta de sus bienes y servicios ambientales, deteriorando el patrimonio natural y el patrimonio económico de las familias habitantes de este territorio, todo ello por omisiones graves en la información reportada por los interesados para acceder al licenciamiento de aquella infraestructura.

Una vez que la comunidad ha vivido estas consecuencias y que revisados los documentos con los que se pretende licenciar una nueva central hidroeléctrica en Montebonito, estos presentan idéntica debilidad en materia de identificación de los impactos ambientales de las intervenciones, es de esperar que esos mismos impactos que afectaron las veredas La Soledad, la Costa y otras en Bolivia – Pensilvania deteriorando el medio natural, también sobrevengan en territorio de los municipios de Manzanares – Marulanda – Fresno, donde se adelantan otros proyectos de Centrales Hidroeléctricas, en este caso la PCH MOntebonito.

Los relatos de la comunidad sobre nuevos proyectos de esta naturaleza en los municipios de Caldas, ponen de presente que posiblemente se están autorizando otras infraestructuras con estas

debilidades que conllevarían detrimento de los ecosistemas, con lo que cobran especial valor herramientas como la participación ciudadana que permita atender con antelación el riesgo de desabastecimiento que sobreviene con las PCH a partir de los túneles de desvío.

Teniendo en cuenta los diferentes estudios abordados y los conceptos que sirvieron de referencia a lo largo de ésta investigación, se llega a validar como cierta la hipótesis propuesta en esta monografía y que con motivo de la construcción de los túneles resultarían afectados los ecosistemas subterráneos donde se hallen depósitos de aguas confinadas que afloran en superficie por diferencias de presión, cuando las estructuras resulten interferidas por el corte dejado tras la perforación de túneles.

De esta manera se cumple con el objetivo de analizar la vinculación de los túneles de las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas con el ciclo del agua: Estudio de Caso El Edén – Bolivia – Caldas y con ello se tiene un referente preventivo de las consecuencias que ellas pueden representar para los ecosistemas y para los bienes y servicios ambientales que ellos proveen.

La información sobre el inventario de oferta hídrica antes y después de la intervención con el túnel de la PCH El Edén confirman que efectivamente se registraron lesiones en las fuerzas que determinan el movimiento de las aguas subterráneas y que como consecuencia sobrevino la pérdida de fuentes de abastecimiento y escasez de oferta hídrica en varias veredas del corregimiento Bolivia en el municipio de Pensilvania.

Para realizar el análisis anunciado, se revisaron los documentos aportados para la obtención de las licencias ambientales que dieron vía libre a la PCH El Edén y a la PCH Montebonito, de esta información se obtuvo los elementos que conllevaron a las conclusiones que dieron validez a la hipótesis, pero que también pusieron en evidencia que estas infraestructuras, técnicamente no son

A filo de Agua, lo que estaría poniendo en tela de juicio el tema de la ética ambiental, la responsabilidad social y los principios de la Cumbre de la Tierra.

Con la revisión bibliográfica, se accedió a la caracterización hidrogeológica de los suelos donde se excavó el túnel de la PCH El Edén y la relacionada con la zona donde se planean excavar los túneles de la PCH Montebonito. De los diferentes documentos estudiados que fueron presentados a la autoridad ambiental para el otorgamiento de licencias ambientales, se pudo determinar serias deficiencias en materia de caracterización hidrogeológica de la zona a interferir con las perforaciones del túnel.

Conclusión de la información obtenida a partir de ésta revisión y del contacto con el territorio, la comunidad y la veeduría ciudadana se tiene que los impactos que sobrevinieron luego de la ejecución del túnel de la PCH El Edén son referente de suficiente significación para retomar y replantear el proyecto de PCH Montebonito, a fin de prevenir el riesgo de escasez de oferta hídrica para consumo humano.

Esta conclusión es válida pues con el proceso investigativo desarrollado y que se consigna en esta monografía, quedó evidenciado y así se caracterizó que los cortes o excavaciones de túneles están asociados a cambios negativos en el ciclo del agua.

La pregunta de investigación confronta la realidad con la teoría descrita en los estudios donde se enfrentan dos conceptos. Uno se inserta en la presentación de la estructura como una tecnología a filo de agua, en tanto que la descripción de las obras corresponde a la adopción de una intervención propia de las grandes centrales generadoras hidroeléctricas con embalse.

Para concluir, resulta evidente en esta literatura que no son suficientes los estudios de suelos que se acompañan a los demás documentos con los que se accede al otorgamiento de licencia ambiental, pues en ellos que solo se caracterizan la formación y la naturaleza de los depósitos, en tanto que la estructura del suelo deja de considerarse como un ecosistema de mayor complejidad respecto a las funciones que el desempeña en los ciclos planetarios.

Lo adecuado es que los estudios de impactos, como mínimo deben cumplir con procedimientos de exploración y localización de aguas subterráneas expuestas ante un eventual corte que modifique las propiedades mecánicas e hidráulicas del nicho que contiene el depósito y su comunicación con el medio externo, y de todo ello mantener la participación ciudadana como garante de los procedimientos.

## 14. Recomendaciones

Los hallazgos y las conclusiones, han contemplado también sugerencias respecto de las licencias ambientales, los estudios que se exhiben para su concesión y el papel de las organizaciones ciudadanas, en particular las veedurías. Ellas se sintetizan a continuación, sin perjuicio de otras recomendaciones que pueden realizarse a este tipo de infraestructuras.

1. *Mayor exigencia en los estudios de suelos.* El otorgamiento de licencias ambientales para PCH que requiera desvío de aguas mediante túneles para conducir la captación hasta el tanque de carga, requiere mayores exigencias en cuanto la caracterización de los suelos en profundidad que permitan un reconocimiento de la oferta hidrogeológica de la zona.
2. *Verificación de las obras.* Las visitas de inspección a los frentes de obra por parte de los organismos ambientales, garantizarían que lo ejecutado corresponda con lo licenciado y que se preserve la confianza en la institucionalidad.
3. *Participación ciudadana.* La presencia de la comunidad a través de veedurías y otras formas de hacer tener conocimiento directo de la intervención del territorio, permite a la sociedad advertir con antelación los impactos de aquellas obras que se venden como panacea del desarrollo.
4. *Manejo de identidad conceptual entre lo licenciado y lo ejecutado.* La responsabilidad con las generaciones futuras lleva a sugerir a las autoridades ambientales, brindar el mayor cuidado con el manejo conceptual de las tipologías de centrales generadoras de electricidad, en especial con el alcance de términos que terminan como distractores significativos, tal es la expresión “*A filo de agua*”, para la PCH El Edén que en la estructura física real corresponde a un túnel con tanque de descarga.

Estas exigencias, no solo de precisión conceptual sino de una detallada caracterización de la zona, debe obedecer más a una responsabilidad social ambiental, tendiente a la preservación de los bienes y servicios de los ecosistemas que dé cumplimiento al principio de responsabilidad para con las generaciones futuras, pero que además se anticipe a la prevención de lesiones en la estructura natural del suelo.

Ello es particularmente importante de cara a los compromisos adquiridos respecto a la preservación de las fuentes de agua, la desertificación y cambio climático, y la protección de los derechos colectivos de las comunidades para acceder a su derecho fundamental al agua para consumo humano, como uno de los propósitos de los Objetivos del Desarrollo.

### Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional del Agua - ANA. (1989). *Codificación de Cuencas Hidrográficas por el método de Otto Pfafstetter*. Río de Janeiro: Superintendencia de Gestión de la Información - ANA.
- Bellino, N. O. (2012). *Aguas subterráneas, conocimiento y explotación*. Buenos Aires - Instituto de Ingeniería Sanitaria: Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires.
- Bredehoeft, J. D. (March 2005, Volume 13, ). The conceptualization model problem—surprise. *Hydrology Journal*, 37 - 46.
- Cardona, A. H. (2010). *Régimen Jurídico de las aguas en Colombia*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
- Carlos Chávez, C. F. (2011). *Finite Difference Solution Of The Boussinesq Equation With Variable Drainable Porosity And Fractal Radiation Boundary Condition*. Morelos: African Journal of Agricultural Research Vol. 6(18), pp. 4210-4222, 12 September, 2011.
- Custom Glitter Text. (29 de Septiembre de 2010). *lafisicaparatodos*. Obtenido de Principio de Arquímedes: <https://lafisicaparatodos.wikispaces.com/Principio+de+Arquimides>
- Decreto 3930 (Presidencia de la República - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial 25 de octubre de 2010) - Reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.
- ECURED. (22 de junio de 2017). [www.ecured.cu](http://www.ecured.cu). Obtenido de Vasos Comunicantes.
- Green Facts. (14 de junio de 2017). [www.greenfacts.org](http://www.greenfacts.org). Obtenido de Facts on Health and the Environment : <https://www.greenfacts.org/es/glosario/def/forzamiento-radiativo.htm>



HIDROVISOR - ASVAMM . (23 de junio de 2017). *sites.google.com*. Obtenido de invhidrovmm:  
<https://sites.google.com/site/invhidrovmm/ubicacion/provincia-hidrogeologica-valle-medio-del-magdalena>

HISPAGUA. (16 junio de 2017). *Hidrogeología*. Madrid: Sistema Español de Información sobre el Agua.

IDEAM - CORMAGDALENA. (Noviembre, 2001). *Estudio ambiental de la cuenca Magdalena - Cauca y elementos para su ordenamiento territorial*. Bogotá: Convenio 003 de 1999.

IDEAM. (Mayo, 2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Instituto Humboldt - INVEMAR- UN - MBG. (Volumen 15 Número 2 - Julio - diciembre de 2014). *Especial embalses y ríos regulados*. Bogotá: JAVEGRAF.

Luz, M. R. (1998). Unidad 3. Leyes de Newton. Capítulo 8. Hidrostática. Vasos Comunicantes. En M. R. Luz, *Física General con experimentos sencillos* (págs. 1-5). Mejiro: Oxford.

Ministerio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial . (Mayo 21 - 22 de 2009). *Red Nacional de Aguas Subterráneas - Taller sobre Planes de Manejo de Aguas Subterráneas*. Bogotá: SIAC - IDEAM.

MinutoDeFísica (Dirección). (2017). *Teoría del Todo: Todas las Fuerzas de la Naturaleza* [Película].

Naciones Unidas Cumbre de la Tierra. (Junio, 1992). *Convenio sobre Diversidad Biológica*. Nueva York - Rio de Janeiro: Secretaría General de Naciones Unidas.

PNUMA - UN. (2004). *Enfoque por Ecosistemas - Convenio sobre Diversidad Biológica*. Montreal: Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica.

Decreto 1640 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2 de Agosto de 2012). Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos,

Quiroga, O. A. (Julio, 2016). *Modelo Hidrogeológico distribuido 3D desarrollado en el área de influencia del túnel de conducción de la central hidroeléctrica El Edén, Caldas, Colombia*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia - Máster Ingeniería Hidráulica y medio ambiente MIHMA.

Rodríguez, C., Vargas, N., Jaramillo, O., Piñeros, A., & Cañas, H. (2011). Capítulo 4. Oferta y uso de agua subterránea en Colombia. En IDEAM, *Estudio Nacional del Agua 2010* (págs. 111-167). Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales .

Rodríguez, F. R. (3 diciembre 2009). Mantos Acuíferos. *Muy Interesante*, 1- 8.

Secretaría del Convenio sobre Diversidad Biológica. (noviembre 24 de 2008). *El enfoque ecosistémico para la Conservación de la Diversidad Biológica*. Ciudad de Panamá: Buriticá Press - Panamá por dentro.

Sociedad Central Hidroeléctrica Montebonito. (2015). *Modificación Licencia Ambiental Hidroeléctrica Montebonito*. Manizales: Central Hidroeléctrica Montebonito.

Unidad Coordinadora del Primer Informe Bienal de Actualización de Colombia. (2015). *Primer Informe Bienal De Actualización De Colombia Ante La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático 2015*. Bogotá: Imprenta Nacional.

## ANEXOS

### Anexo A: Regulación Hídrica (porcentaje fichas de estudio)

INDICADOR	VARIABLES NECESARIAS	MÉTODOS O INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN
Número de estudios encontrados	Tratados Internacionales	Convención de RAMSAR
Número de normas sobre regulación de las aguas subterráneas	Nivel nacional  Nivel local	<p>La Ley 715 de 2002. (inversiones en el sector ambiental)</p> <p>La Ley 99 de 1993 creó el Ministerio del Medio Ambiente y organizó el Sistema Nacional Ambiental, SINA. De acuerdo con esta ley, el Ministerio del Ambiente es la instancia que puede fijar las pautas para el ordenamiento de las cuencas hidrográficas.</p> <p>Decreto 1277 organiza y establece el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).</p> <p>La Ley 70 de 1993, permite el acceso a la propiedad comunal de comunidades negras, en particular en la región del Pacífico.</p> <p>Ley 99 de 1993. Conservación y protección del recurso agua</p> <p>La Ley 99 de 1993, establece que el manejo ambiental en Colombia debe ser democrático, participativo y descentralizado.</p>

La Ley 141 de 1994, crea el Fondo Nacional de Regalías, por concepto de aprovechamiento de los recursos naturales.

Mediante el Decreto 1729 de agosto de 2002 se reglamenta el Decreto Ley 2811 de 1974 y parte del Artículo 5 de la Ley 99 de 1993 en lo relacionado con la ordenación de cuencas, la elaboración y ejecución de planes de manejo de cuencas así como la creación de los consejos de cuencas.

Ley 2 de 1959. Reserva forestal y protección de suelos y agua.

Decreto 1449 de 1977. Disposiciones sobre conservación y protección de aguas, bosques, fauna terrestre y acuática

Decreto 1681 de 1978. Sobre recursos hidrobiológicos

Decreto 2857 de 1981. Ordenación y protección de cuencas hidrográficas

Mediante el Acuerdo 41 de 1983 se determinaron los métodos y procedimientos para el manejo de cuencas.

Normatividad ambiental y sanitaria

Decreto de Ley 2811 de 1974 (que se constituyó en uno de los primeros esfuerzos en Iberoamérica para expedir una normatividad integral sobre el medio ambiente).

Decreto 2811 de 1974 Libro II, Parte VIII. De los bosques, de las áreas de reserva forestal, de los aprovechamientos forestales, de la reforestación. Art. 194. Ámbito de aplicación; Art. 195-199 Definiciones; Art. 196, 197, 200 y 241 Medidas de protección y conservación; Art. 202 a 205 Áreas forestales. Art. 206 a

210 Áreas de reserva forestal; Art. 211 a 224  
Aprovechamiento forestal

Documento CONPES 2834 de 1996. Política de bosques.

Decreto 901 de 1997 se determina fijar una tarifa mínima por unidad de contaminación vertida, vigente para todo el país. Tasa Retributiva.

Tabla A. Regulación Hídrica - Porcentaje Fichas. Fuente: Página web [Minambiente.gov.co](http://Minambiente.gov.co)