

**ANÁLISIS DE LOS CRITERIOS FÍSICOS DE LA
METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES
AMBIENTALES DEL MINISTERIO DE AMBIENTE Y
DESARROLLO SOSTENIBLE
CASOS PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS MAYABA Y
SANTO DOMINGO**

GABRIEL HERNÁN ÁLVAREZ MONTOYA

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

PABLO AGUDELO RESTREPO MSC, PHD (C)



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA
INGENIERÍA CIVIL
ENVIGADO
2013**

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, a mi novia Carolina y a mis amigos por su amor y constante apoyo, y a la empresa I-Consult por la información y enseñanzas necesarias para la realización de este trabajo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

CONTENIDO

	pág.
CONTENIDO	2
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN.....	11
1. PRELIMINARES.....	12
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Objetivos del proyecto	13
1.2.1 Objetivo General.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 Marco de referencia.....	13
1.3.1 Análisis de metodologías.....	14
1.3.2 Descripción de la metodología del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008) 18	
1.4 Casos de estudio.....	23
1.4.1 Proyecto Hidroeléctrico Mayaba	23
1.4.2 Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo	25
2. METODOLOGÍA.....	27
2.1 Evaluación de la aplicabilidad de criterios HIDROLÓGICOS de la metodología MADS.	27

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.1.1	Acerca del análisis de los criterios específicos de la zona de estudio.....	27
2.1.2	Acerca del análisis a los criterios hidrológicos.....	28
2.2	Estimación de los caudales ambientales.....	34
2.2.1	Paso 1: Recopilación de información.....	34
2.2.2	Paso 2: Análisis de consistencia y homogeneidad de la información hidrológica.....	36
2.2.3	Paso 3: Análisis de correlación de la hidrología con los índices de fenómenos macroclimáticos.....	36
2.2.4	Paso 4: Clasificación de registros por condición hidrológica.....	36
2.2.5	Paso 5: Cálculo de índices hidrológicos 7Q10 y Q95%.....	38
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	41
3.1	Evaluación de la aplicabilidad de criterios HIDROLÓGICOS de la metodología MADS41	
3.1.1	Criterios específicos de la zona de estudio.....	41
3.1.2	Criterios Hidrológicos.....	44
3.2	Estimación de los caudales ambientales.....	60
3.2.1	Paso 1: Recopilación de información.....	60
3.2.2	Paso 2: Análisis de calidad, homogeneidad y consistencia.....	66
3.2.3	Paso 3: Correlación con índices macroclimáticos.....	67
3.2.4	Paso 4: Clasificación de registros por condición hidrológica.....	72
3.2.5	Paso 5: Cálculo de índices hidrológicos.....	72
4.	DISCUSIÓN.....	79
4.1	Discusión sobre el análisis de la metodología para la estimación de caudales ambientales de proyectos hidroeléctricos del MADS.....	79
4.1.1	Acerca de la aplicabilidad de los criterios hidrológicos de la metodología MADS	79

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4.2	Discusión sobre el análisis hidrológico de 39 estaciones limnimétricas y limnigráficas de regiones con potencial hidroenergético medio-alto y alto.....	82
4.2.1	Acerca de las pruebas de homogeneidad y consistencia de 39 series limnimétricas y limnigráficas	82
4.2.2	Acerca de la tendencia de 39 series limnimétricas y limnigráficas	82
4.2.3	Acerca de los umbrales de los caudales mínimos de 39 series limnimétricas y limnigráficas.....	82
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
5.1	Conclusiones	83
5.2	Recomendaciones.....	84
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	ANEXO 1. PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD Y CONSISTENCIA	88
	ANEXO 2. TENDENCIA EN LOS PERCENTILES MEDIOS DE LAS SERIES DE CAUDAL	89
	ANEXO 3. UMBRALES DE MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LAS ESTACIONES DE CAUDAL	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Componentes principales de la propuesta metodológica del MAVDT. Fuente: Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008	20
Figura 2	Esquema general de una central a pie de presa. (Ecovive, 2013).....	23
Figura 3	Localización general del Proyecto Hidroeléctrico Mayaba.....	24
Figura 4	Localización general del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo. Fuente: Google Earth	25
Figura 5	Esquema general de una PCH a filo de agua. (Shalahuddin-Hasan, 2013).....	26
Figura 6	Mapa de Potencial Hidroenergético de Colombia. (UPME, 2002)	30
Figura 7	Mapa de clasificación regional de rendimientos hídricos	43
Figura 8	Estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM, y región con Potencial Hidroenergético Medio-Alto. Elaboración propia.	45
Figura 9	Histograma de frecuencias de los años de registro de las estaciones de caudal del IDEAM 46	
Figura 10	Resultados de análisis de tendencias mensuales en los ríos.....	52
Figura 11	Serie de caudales máximos anuales en diversos ríos de Colombia.....	53
Figura 12	Evaluación de tendencias de largo plazo en los registros de caudal de la estación San Juan	54
Figura 13	Curva de duración de caudales de la estación Puente Carretera ubicada sobre el río Guarinó	57
Figura 14	Histograma de frecuencia del umbral de los caudales mínimos de 39 estaciones limnimétricas y limnigráficas	60
Figura 13	Serie de caudales de la estación San Juan	61
Figura 14	Serie de caudales de la estación Tres y Medio.....	62

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Figura 15	Regresión por mínimos cuadrados de los datos de la estación San Juan vs los datos de la estación Tres y Medio.....	63
Figura 16	Serie de caudales de la estación San Juan rellena con los datos de la estación Tres y Medio.....	64
Figura 17	Serie de caudales medios diarios en el sitio de captación del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo obtenida a partir de la transposición de caudales del río Guarinó	65
Figura 18	Serie de caudales medios diarios de la estación Puente Carretera ubicada sobre el río Santo Domingo	65
Figura 19	Resultados de la prueba de homogeneidad para las estaciones San Juan (izquierda) y Tres y Medio (derecha)	66
Figura 20	Resultado de la prueba de homogeneidad para los caudales del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo	67
Figura 21	Correlograma con diferentes índices macroclimáticos para la estación San Juan	68
Figura 22	Correlograma con diferentes índices macroclimáticos para la estación Tres y Medio	69
Figura 23	Correlograma con diferentes índices macroclimáticos para los caudales del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo	71
Figura 24	Ajuste a la distribución Gumbel por mínimos cuadrados de los caudales semanales mínimos anuales de la estación San Juan rellena	72
Figura 25	Curva de duración de caudales de la estación San Juan para los años Niño	73
Figura 26	Curva de duración de caudales de la estación San Juan para los años Niña	73
Figura 27	Curva de duración de caudales de la estación San Juan para los años Normales	74
Figura 28	Propuesta de caudal ambiental del Proyecto Hidroeléctrico Mayaba para los años Niño	75
Figura 29	Propuesta de caudal ambiental del Proyecto Hidroeléctrico Mayaba para los años Niña	75

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Figura 30	Propuesta de caudal ambiental del Proyecto Hidroeléctrico Mayaba para los años Normales	76
Figura 31	Ajuste a la distribución Gumbel por mínimos cuadrados de los caudales semanales mínimos anuales de la serie de caudales del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo	77
Figura 32	Propuesta de caudal ambiental del el Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo para los años Niño.....	77
Figura 33	Propuesta de caudal ambiental del el Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo para los años Niña.....	78
Figura 34	Propuesta de caudal ambiental del el Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo para los años Normales.....	78

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Estaciones de caudal suministradas por I-Consult SAS	31
Tabla 2	Estaciones de caudal utilizadas para la estimación del caudal ambiental en el Proyecto Hidroeléctrico Mayaba	34
Tabla 3	Estaciones de caudal utilizadas para la estimación del caudal ambiental en el Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo	35
Tabla 4	Consenso Internacional del Niño.....	37
Tabla 6	Porcentaje de datos faltantes y longitud de registro en las estaciones de caudal suministradas por I-Consult	47
Tabla 7	Resultados de la aptitud de las series temporales para su utilización en la metodología MADS.....	49
Tabla 7	Resumen de los resultados de tendencias de 39 estaciones limnimétricas y limnigráficas.....	54
Tabla 8	Resumen de la identificación del umbral de los caudales mínimos de 39 estaciones limnimétricas y limnigráficas	58
Tabla 8	Correlograma con diferentes índices macroclimáticos para la estación San Juan. En rojo los coeficientes que no están dados por el azar.....	69
Tabla 9	Correlograma con diferentes índices macroclimáticos para la estación San Juan. En rojo los coeficientes que no están dados por el azar.....	70
Tabla 10	Correlograma con diferentes índices macroclimáticos para los caudales del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo. En rojo los coeficientes que no están dados por el azar	71

RESUMEN

El caudal ambiental tiene una función importante en el desarrollo de proyectos relacionados con extracciones de caudal de corrientes superficiales (centrales hidroeléctricas, acueductos, distritos de riego) pues determina la cantidad y variación temporal de los caudales mínimos a establecer en un tramo afectado del río, para cumplir objetivos ambientales. Para su estimación, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) adoptó una metodología desarrollada en la Universidad Nacional de Colombia, la cual abarca el análisis de criterios físicos, bióticos y sociales.

El trabajo se enfoca en un problema particular en el marco de la gestión de recursos hídricos, particularmente en el planeamiento de proyectos hidroeléctricos a filo de agua de diferentes tipologías (Pequeña Central Hidroeléctrica PCH y central a pie de presa), ya que la metodología se enfoca particularmente en grandes proyectos hidroeléctricos con embalses de regulación. Principalmente se habla de sus debilidades en cuanto a la aplicabilidad de los criterios físicos, con énfasis en los criterios hidrológicos, ya que no tiene en cuenta la escasez de información hidrológica ni la diversidad de las cuencas colombianas.

Considerando estas debilidades se propuso un análisis de los criterios hidrológicos, mediante la evaluación de la aplicabilidad de éstos en el contexto colombiano y con base en ello se estimó el caudal ambiental en dos proyectos hidroeléctricos a filo de agua (sin embalse de regulación). Para la evaluación de la aplicabilidad, se analizó la base de datos de estaciones limnimétricas y limnigráficas disponibles en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), relacionándola con el Mapa de Potencial Hidroenergético elaborado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME); luego se verificó la cantidad de estaciones que cumplen el requerimiento sobre longitud de registro. Esta relación permitió contabilizar la información hidrológica disponible para su utilización en la metodología y en la formulación de proyectos hidroeléctricos. Además se verificó la aptitud de la información en cuanto a calidad (homogeneidad y consistencia) de una muestra de 39 estaciones adquiridas al IDEAM para estimar en qué proporción la información disponible en dicha entidad es apta para la utilización en la metodología. Para la estimación de los caudales ambientales se siguieron los Pasos 1 a 5 descritos por la metodología que, en síntesis, consisten en la recopilación de información base, pruebas de homogeneidad y consistencia, correlación con índices macro-climáticos y estimación de índices hidrológicos.

Los análisis anteriores permitieron determinar que algunos criterios hidrológicos no son aplicables y que la información hidrológica de Colombia carece de calidad y distribución espacial, especialmente en los sitios con potencial hidroenergético. Adicionalmente, un bajo porcentaje de la misma información es apta para ser aplicada en la metodología.

Palabras clave: Caudal ambiental, caudal ecológico, Proyecto Hidroeléctrico, estaciones limnimétricas y limnigráficas, homogeneidad, consistencia, índices macroclimáticos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ABSTRACT

Environmental flow has an important function in the development of projects related to extraction of flow of rivers (hydroprojects, aqueducts, irrigation districts) because it determines the amount and temporal variation to establish minimum flows in the affected section of the river, to meet environmental objectives. For its estimation, the Ministry of Environment and Sustainable Development (MADS) adopted a methodology developed in the National University of Colombia, which covers the analysis of physical, biotic and social criteria.

The work focuses on a particular problem in the context of water resources management, particularly in the planning of run off river hydroelectric projects of different types (Small Hydroelectric Central –PCH- and “bottom of dam”), and that the methodology is focuses particularly on big hydroelectric projects with reservoirs of regulation. Mainly talking about their weaknesses in terms of the applicability of the physical criteria, and does not take into account the scarcity of hydrological information and the diversity of the Colombian basins, among others.

Considering these shortcomings it was proposed an analysis of the physical criteria, by evaluating their applicability in the Colombian context and based on this it was estimated the environmental flow in two hydroprojects with type run of river (without regulating reservoir). To evaluate the applicability, it was analyzed the database of flow stations available at the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), relating with the Hydropower Potential Map elaborated by the Mining and Energy Planning Unit (UPME), then it was verified the amount of stations that meet the requirement of record length. This relationship allowed accounting the hydrological information available for use in the methodology and in developing of hydropower projects. Also it was verified the suitability of the information regarding quality (homogeneity and consistency) of a sample of 39 stations acquired in the IDEAM to estimate what proportion of the information available on that entity is suitable for use in the methodology.

For the estimation of environmental flows it was followed Steps 1-5 described in the methodology, in summary, they consist on information gathering, homogeneity and consistency tests, correlation with macro-climatic indices and estimation of hydrological indices.

Previous analyzes allowed to determine that some physical criteria are not applicable and hydrological information of Colombia lacks quality and spatial distribution, especially in the sites with potential hydropower. Additionally, a small percentage of the same information is suitable to be applied in the methodology.

Keywords: environmental flow, instream flow, ecological flow, Hydroelectric Project, flow stations, homogeneity, consistency, macroclimatic rates

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

INTRODUCCIÓN

Colombia, por su topografía, ubicación geográfica y condiciones hidrológicas tiene un gran potencial de desarrollar proyectos hidroeléctricos (Smith, Vesga, & Cadena, 2006). Es típico que estos proyectos planteen la extracción de una porción del líquido disponible del flujo natural de la corriente a afectar, estableciendo otra porción en el tramo afectado por el proyecto, lo que se conoce como caudal ambiental o ecológico. Éste es definido como el caudal necesario para mantener una provisión del recurso de suficiente calidad, cantidad, duración y estacionalidad para preservar los ecosistemas asociados a la fuente afectada (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008), concepto clave en el planteamiento de proyectos hidroeléctricos.

Para lo anterior, en el año 2008 el antiguo Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), encomendó a la Universidad Nacional el desarrollo de una metodología para establecer el caudal ambiental para el licenciamiento de proyectos de aprovechamiento hídrico. Esta, tiene como objetivo ser aplicable al contexto colombiano mediante el cumplimiento de una serie de criterios y lineamientos filosóficos, ejecutando una serie de procedimientos.

Esta metodología comprende la inclusión de criterios físicos, bióticos y socioeconómicos, la cual presenta falencias en cuanto a la aplicabilidad de los criterios físicos, sobre todo en los criterios hidrológicos, ya que desde la concepción de los mismos se está desconociendo la escasez de información hidrológica y las diversas condiciones propias de las cuencas en Colombia.

Dentro del contexto anterior, se crea un espacio propicio que permite proponer un análisis de la aplicabilidad de los criterios hidrológicos de la metodología para la estimación de caudales ambientales, propuesta por el MADS.

Para llevar a cabo esto, se presenta en el capítulo 2 la metodología propuesta para realizar el análisis de aplicabilidad en el contexto colombiano, de los criterios específicos de la zona de estudio, los criterios hidrológicos y los criterios de calidad de agua. Con base en ello, se estima el caudal ambiental de dos proyectos hidroeléctricos de tipologías diferentes, que ejemplifican lo detallado en el análisis. En el capítulo 3, se presentan los resultados del análisis a la metodología y finalmente el capítulo 4 presenta la discusión a los resultados.

El principal beneficio que se proyecta de este trabajo es analizar los criterios y procedimientos de la metodología, para evidenciar falencias que pueda llegar a tener al ser aplicados en el contexto colombiano.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1. PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los caudales ambientales son aquellos que suplen la necesidad ambiental de las cuencas asociadas; es decir, que consideran la demanda ecológica, social, paisajística y de calidad de agua (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008). El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible colombiano (MADS), antes Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), es la “entidad pública del orden nacional rectora en materia de gestión del ambiente y de los recursos naturales renovables” (MADS, 2013); por esto, buscando regular los estudios necesarios para el licenciamiento de proyectos relacionados con la utilización del caudal de una corriente natural, solicitó en el año 2008 al Grupo de Investigación en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional con sede en Bogotá, el desarrollo de una metodología que permitiera estimar y estudiar los caudales ambientales, que se enfocó principalmente en grandes centrales hidroeléctricas en operación y con embalse de regulación.

Esta metodología propone una serie de procedimientos para cumplir con diferentes criterios en los medios físico, biótico y socioeconómico. Particularmente, los procedimientos planteados para el medio físico (hidrología, geomorfología, hidráulica y calidad de aguas) se han propuesto sin considerar diferentes factores que se encuentran en el contexto colombiano como lo son el estado de la información hidrológica, la localización, la diversidad de condiciones naturales, el tipo de proyectos. Sin embargo, el MADS y algunas Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) han estado exigiendo la aplicación de esta metodología para el licenciamiento de cualquier tipo de proyecto relacionado con corrientes de agua. Esto ha estado dificultando la formulación de aprovechamientos, particularmente las centrales hidroeléctricas que no tienen embalse de regulación.

El análisis propuesto busca demostrar, en conclusión, que esta metodología no puede generalizarse a los diferentes tipos de proyectos hidroeléctricos ni a las diversas condiciones colombianas. Para esto, se propone evidenciar sus falencias mediante un análisis de sus procedimientos y criterios, y su aplicación en la planeación de dos proyectos hidroeléctricos.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo General

Analizar los criterios del componente físico de la metodología adoptada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) para la estimación de caudales ambientales de cualquier tipo de proyecto hidroeléctrico.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la aplicabilidad de los criterios hidrológicos de la metodología MADS para la estimación de caudales ambientales en Colombia.
- Estimar los caudales ambientales para los proyectos de generación de energía hidroeléctrica, Mayaba y Santo Domingo, según los criterios hidrológicos de la metodología MADS.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

Se cree que compatibilizar el aprovechamiento de caudales fluviales con el mantenimiento de un estado ecológico global aceptable es posible (Diez Hernández & Olmeda Sanz, Diseño eco-hidrológico de pequeñas centrales hidroeléctricas: evaluación de caudales ecológicos, 2008), (Zapata G., 2008). Es por esto que al definir algún tipo de aprovechamiento de un río y se regula o controla su caudal, surgen los conceptos de caudal ecológico y ambiental (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008). Aunque se han obtenido diferentes denominaciones dependiendo de los objetivos que se busquen con su preservación (Carvajal, 2007), en términos generales, el caudal ecológico se define como el necesario para mantener una provisión del recurso de suficiente calidad, cantidad, duración y estacionalidad para preservar los ecosistemas asociados a la fuente afectada. Una consideración adicional referente a beneficios ambientales, sociales y económicos aguas abajo se considera caudal ambiental (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008).

Así mismo, la idea sobre su variabilidad temporal y periodicidad ha cambiado a través del tiempo y del desarrollo de los diferentes estudios realizados. En los años 70 se propuso dejar un caudal mínimo con un valor fijo; en los 80 se recalcó la importancia de la variación estacional natural de los caudales; en los 90 se planteó el establecimiento de un régimen de caudales relacionado a las funciones ecológicas del sistema y los cambios en el hábitat; y los enfoques recientes proponen mantener un buen estado ecológico del sistema, bajo la inclusión de la recuperación en los planes de manejo. (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008)

Con base en lo anterior, la literatura reciente clasifica las metodologías existentes en tres categorías:

- metodologías de tipo hidrológico,
- metodologías hidráulicas y de simulación de hábitat fluvial,

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- metodologías holísticas o funcionales

Adicionalmente, la determinación de los caudales ambientales pueden abordar dos perspectivas, dependiendo si se busca lograr objetivos a través del establecimiento de parámetros o si lo que se busca es lograr un escenario negociado entre los diferentes actores afectados (naturaleza, usos del recurso aguas-abajo, desarrollo social).

1.3.1 Análisis de metodologías

○ Metodologías de tipo hidrológico

Las metodologías de tipo hidrológico buscan realizar estimaciones a partir de series históricas, utilizando estimadores estadísticos sobre la serie (Diez Hernández & Olmeda Sanz, Diseño eco-hidrológico de pequeñas centrales hidroeléctricas: evaluación de caudales ecológicos, 2008). Estos resultan de la aplicación de diversos tratamientos estadísticos a las series de caudales con el fin de determinar un “caudal mínimo” en función de alguna característica del comportamiento probabilístico de la serie, como los estimadores de tendencia central, percentiles de la curva de duración de caudales, períodos de retorno o simplemente porcentajes de los caudales medios (Diez Hernández & Burbano Burbano, Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas, 2006). Estas suponen que los ecosistemas se han adaptado al comportamiento hidrológico del cauce y manteniendo un patrón histórico de los caudales se sostiene su “adecuada” conservación. Son de fácil, rápida y económica utilización; por lo que son los métodos más aplicados tanto internacionalmente como en Colombia (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008)

Por lo general, estas aproximaciones han sido desarrolladas mediante la observación del estado ecológico de corrientes de características similares en una región específica y su correlación con las series históricas de las corrientes. Acerca del estado ecológico, se han tomado especies de alta importancia social como objetivo de conservación (generalmente especies de salmónidos). Por esto, han sido objeto de críticas, puesto que su utilización en regiones diferentes a las de su desarrollo tiene implícita la atrevida suposición de que tanto la hidrología como el comportamiento de los ecosistemas correlacionan de la misma manera.

Estas metodologías han evolucionado en su recomendación a lo largo de los años. Las primeras desarrolladas, antes de la década de los 80, recomiendan un valor fijo de caudal en el tramo afectado durante todo el año. Posteriormente, tomando en cuenta las diferentes épocas de desarrollo de las especies objetivo (reproducción, desove, crecimiento, freza y lavado del sustrato), recomiendan el establecimiento de caudales estacionales (períodos secos y húmedos). Finalmente se ha consensuado en el establecimiento de un régimen de caudales ambientales que emulan la variación natural del río a lo largo del año.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Entre las principales metodologías hidrológicas se encuentran:

- En Colombia se ha recomendado por parte del IDEAM a las autoridades ambientales la consideración del caudal superado el 97,5% del tiempo ó el 25% del caudal medio multianual más bajo de la corriente, dependiendo de los datos disponibles. (Rivera, Marín Ramírez, & Vanegas, 2004).
- Chiang y Johnson (1976, citado en Pyrce, 2004) recomiendan el caudal mínimo semanal con 7 años de período de retorno (7Q10) con el fin de garantizar la dilución de contaminantes buscando objetivos de calidad de agua. Diversos autores, principalmente en Norteamérica citan correlación de las variables físicas que afectan la biota con caudales mínimos semanales de diferentes períodos de retorno (2 a 25 años), variando los resultados según la región donde fueron analizados.
- Diversos autores citan percentiles de excedencia de la curva de duración de caudales (desde 50 hasta 99) como diferentes índices biológicos, con resultados aceptables. Ocurre el mismo fenómeno que con los caudales mínimos semanales: sus resultados dependen de la región donde han sido utilizados y los objetivos de preservación (Pyrce, 2004). Son ampliamente utilizados en los casos en que se requiere una variación estacional, es decir, un régimen ambiental de caudales, pero pueden ser calculados para distintas agregaciones temporales.
- **El método de Tennant:** es uno de los más utilizados a nivel mundial y consiste en la relación encontrada por la US Fish and Wildlife Service en corrientes localizadas en Nebraska, Wyoming y Montana entre la salud ecológica y fracciones fijas del caudal medio anual explícitas para períodos secos y húmedos (Mesa, 2009). Este método ha sido modificado para su estimación mes a mes.
- **Range Variability Approach:** desarrollado, y adaptado para diferentes países, para grandes proyectos que consideran regulación de caudales. Consiste en la limitación de reducción a 32 diferentes indicadores estadísticos de la serie de caudales diarios. (Martínez Santa-María & Fernández Yuste, 2008)
- En Austria el caudal ecológico se ha calculado como función (generalmente el 20%) de indicadores como el caudal superado durante 300 ó 347 días en el año. (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008)
- En los Estados Unidos de América se ha definido el caudal ecológico como la mediana de los caudales medios mensuales del mes más seco (Caudal medio base) para series con más de 25 años de registro, o también a partir de rendimientos hídricos para cuecas con información escasa. También se ha definido como el caudal superado el 90% del tiempo, clasificado mensualmente, asignando un valor que se supere el 50% del tiempo para los meses más caudalosos.
- El método de **Hoppe**, utilizado en los EEUU, propone porcentajes fijos, que varían del 17 al 80% de percentiles de la curva de duración de caudales medios diarios, en función de las diferentes etapas del ciclo de vida de salmónidos. (Castro Heredia, Carvajal Escobar, & Monsalve Durango, 2006)
- En Dakota del Sur se utiliza el caudal mínimo semanal de 5 ó 25 años de período de retorno como límites superior e inferior respectivamente, en función del ciclo de vida de los salmónidos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- En Texas se estima el caudal ecológico como un porcentaje de la mediana de los medios mensuales durante períodos húmedo y seco.
- En Georgia (EEUU) se ha establecido el 30% del caudal medio multianual para corrientes no reguladas.
- En Brasil se ha recomendado fracciones fijas (porcentajes) de un rango que va desde el percentil 85 al 95 de la curva de duración de caudales.
- En Chile se siguen diferentes criterios como: porcentajes fijos del caudal medio multianual (10-20%), la mitad del caudal excedido durante el 95% del tiempo ó el caudal excedido durante 347 días en el año.
- En Francia y España la ley indica que se debe disponer un caudal mínimo en la corriente correspondiente al 10% del caudal medio multianual, pero en el país ibérico se deja a potestad de la Confederaciones Hidrográficas y los Órganos de Cuenca definir el caudal ecológico para sus jurisdicciones.
- En Suiza se propone un porcentaje del caudal superado 347 días en el año, y existe un software de base estadística (HYMOD-F) para su asignación.
- En Dinamarca se recomienda estimar el caudal ambiental como la mediana de los caudales mínimos diarios.

○ **Metodologías de tipo hidráulico y de simulación del hábitat**

Las metodologías de tipo hidráulico pretenden relacionar los caudales circulantes en el cauce con variables de la hidráulica unidimensional como indicación de la capacidad biogénica del río. Entre estos el de mayor utilización analiza la evolución del perímetro mojado con el caudal y asigna el valor del caudal ecológico como el punto de inflexión.

Una evolución de los métodos hidráulicos, los métodos de simulación del hábitat, consisten principalmente en la relación de curvas de preferencia de especies objetivo (generalmente salmónidos) ante distintas variables hidráulicas provenientes de modelaciones uni, bi o tridimensionales, que definen las variables físicas que determinan el hábitat ecológico, así como variables de calidad del agua, temperatura y composición del sustrato. La más reconocida y utilizada, la “Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)” (García de Jalón & González del Tánago, 2004), mide el área habitable bajo estas modelaciones, buscando establecer un caudal variable en el tiempo que maximice esta última (Diez Hernández & Burbano Burbano, Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas, 2006).

Son criticadas por buscar la salud ecológica en una sola especie del ecosistema, desconociendo las relaciones complejas de un sistema dinámico y dependiente de otras variables y especies. Además son fundamentadas en una serie de suposiciones que no son validadas como lo exponen Hudson y Chadderton (citados en Mesa, 2009) y según Orth y Leonard (citados en Mesa, 2009) se ha llegado a conclusiones similares a las obtenidas por métodos más simples.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

○ **Metodologías holísticas o funcionales**

Desarrollados principalmente en Suráfrica y Australia, consisten en la asignación de un régimen de caudales ambientales mediante la evaluación de un grupo multidisciplinario. Se basan en la relación funcional de los diferentes intereses implicados en el uso del agua, abarcando diferentes aspectos hidrológicos, ecológicos, sociales y económicos (Bedoya Soto, 2005). Sus principales ventajas radican en que son robustas, inclusivos, flexibles, completos y dirigidos a explorar opciones. Estas tienen principalmente dos enfoques (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008):

- Aproximación 'bottom-up', que construyen un régimen de caudal modificado mediante la adición de componentes de caudal a una línea base.
- Aproximación 'top-down' que analizan cuánto se puede modificar el régimen de caudales del río antes de una degradación ecológica seria.

Entre los principales métodos holísticos se encuentran:

- **Building Block Methodology (BBM):** es esencialmente una aproximación prescriptiva, con la que se construyen regímenes de caudales para mantener una condición predeterminada (King, Tharme, & Villiers, 2008). Constituye una serie de métodos de evaluación de impactos ante la modificación del régimen de caudal por parte de profesionales en diferentes áreas (biólogos especializados en peces, vegetación riparia, macroinvertebrados y profesionales en las áreas de geomorfología y recursos hídricos), considerando, a su vez, la importancia económica del río a nivel local, regional, nacional e internacional (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008). Tiene un manual detallado que describe la serie de estudios interdisciplinarios para seguir.
- **Downstream Response to Imposed Flow Transformations (DRIFT):** Derivada de la BBM, es una metodología basada en escenarios negociadores entre los intereses implicados en la utilización del agua, con un fuerte componente socio-económico de evaluación de impactos (King, Tharme, & Villiers, 2008). En general, se resume en cuatro módulos (biofísico, socioeconómico, desarrollo de escenarios y económico) en los que se analizan los diferentes impactos de los escenarios, para posteriormente formular un régimen de caudales ambientales.
- **Método de evaluación por panel de expertos (EPAM):** Desarrollado en Australia, plantea que un grupo de expertos en varios temas (peces, macroinvertebrados y recursos hídricos) planteen un régimen de caudal ambiental mediante la valoración de los efectos del caudal sobre el sistema. Requiere pocos datos de campo, confía en el conocimiento de un grupo de profesionales altamente calificados y está enfocado hacia la conservación de peces. Es simplista y altamente subjetivo. (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008)
- **Método de evaluación por equipo científico (SPAM):** Derivado del EPAM, pero incorpora una recolección exhaustiva de datos de campo y la interpretación de la información en el sitio.
- **El Caudal de Garantía Ambiental:** Desarrollada en el departamento de Antioquia por personal de las Empresas Públicas de Medellín y ampliamente utilizado para la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

asignación de caudales ecológicos en proyectos hidroeléctricos en Colombia. Consiste en determinar un factor de reducción al caudal mínimo histórico de la corriente mediante el análisis de 10 variables ambientales a saber: longitud del tramo afectado, calidad fisicoquímica y biológica del agua, demanda para dilución de contaminantes, importancia de la actividad pesquera, migración de peces, especies acuáticas amenazadas, importancia del transporte fluvial, modificación del paisaje y usos del agua (Grecco, 2005).

1.3.2 Descripción de la metodología del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008)

Con una revisión de las diferentes metodologías existentes, con sus fortalezas técnicas y sus limitaciones, se desarrolló una metodología para estimar y evaluar los caudales ambientales. Según los proponentes, esta se desarrolló en búsqueda de una propuesta que cumpla criterios de objetividad, flexibilidad, adaptabilidad, costo-efectividad, ecosistémicos y de integralidad, precaución ambiental, con fundamento científico sólido y como parte integral del componente del marco normativo y de gestión ambiental. Se resalta también que ninguna de las metodologías anteriores se podía aplicar directamente en el contexto colombiano por las limitaciones de cada una de ellas y dadas las particularidades de los diferentes componentes del medio ambiente presentes en Colombia (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008). Se sostiene además que si se pudiera aplicar debería estar filosóficamente basada en un enfoque ecosistémico, con interacción del componente hidrológico, hidráulico y de calidad del agua, biótico, socioeconómico y legal; describiendo explícitamente los criterios derivados de estos componentes, y que finalmente dan los lineamientos necesarios para la metodología. Estos están resumidos a continuación:

- Criterios específicos de la zona de estudio: es la definición de las características del aprovechamiento sobre la corriente, la definición de la longitud del tramo afectado y la identificación de los usos y proyecciones del agua río abajo del sitio afectado.
- Criterios hidrológicos: se refiere a la cantidad, calidad, consistencia y agregación temporal de la información hidrológica necesaria para la caracterización del comportamiento temporal del recurso hídrico en la cuenca en estudio. Además, se habla del análisis de la variabilidad hidrológica interanual y estacional de la corriente, teniendo en cuenta las particularidades de la hidrología colombiana y la correlación con diferentes fenómenos macroclimáticos incidentes. Lo anterior tiene como objetivo realizar la primera propuesta hidrológica con metodologías de estimación de caudales ambientales, internacionalmente aceptadas, considerando que los ecosistemas se han adaptado a las variaciones temporales de los caudales, y recomienda preservar la misma variabilidad después de la intervención. Aquí se mencionan que entre las metodologías más aplicadas se encuentran el índice 7Q10 y el Q95%; que estas, según diferentes autores, pueden ocasionar estrés en los ecosistemas porque subestiman los caudales

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ambientales y por esto la propuesta metodológica debe tener un criterio que garantice caudales superiores. Otra consideración es la comparación de características para las condiciones con y sin proyecto respecto a la alteración del régimen hidrológico.

- Criterios ecológicos: se expone la importancia de tener un enfoque comunitario y no específico, es decir, que la evaluación de caudales ambientales debe relacionarse con la cantidad y calidad del hábitat para las comunidades bióticas, por lo que se preferirán el uso de variables comunitarias (composición, riqueza, diversidad, interacciones tróficas) al empleo de parámetros de especies particulares. Considera, además, la utilización de variables que integren información de una determinada comunidad, para lo que se mencionan los Índices de Integridad Biótica (IIB) de cada comunidad que sirven para representar la salud y la funcionalidad ecológica del sistema rivereño. Adicionalmente, se recomienda el uso de grupos de especies indicadoras de la calidad del agua y cambios en el ecosistema. Por último, se propone evaluar la calidad y disponibilidad del hábitat mediante el uso de modelaciones hidrológicas, hidráulicas y de calidad del agua para la conformación de un Índice de Integridad del Hábitat (IIH).
- Criterios hidráulicos y de calidad del agua: se propone que debe conocerse los usos actuales y prospectivos del agua aguas-abajo definidos por los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas y las metas y objetivos en cuanto a calidad, para garantizar el uso sostenible del recurso. Además se incluye el análisis particular de las corrientes por medio de secciones transversales y diferentes variables que afecten, midan o modelen el IIH, así como la evaluación del impacto en la calidad del agua y el factor de asimilación.

Con los criterios definidos, se presentan los lineamientos de la metodología en la Figura 1.1.

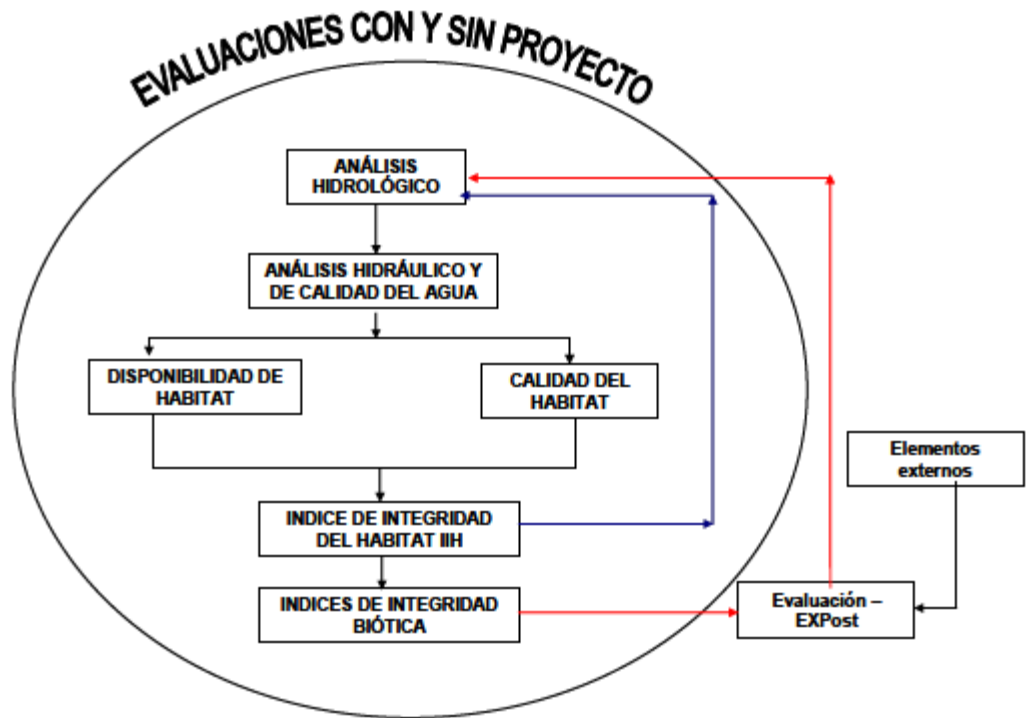


Figura 1 Componentes principales de la propuesta metodológica del MAVDT.
Fuente: Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008

Se propone el seguimiento de nueve pasos para la integración de los criterios, que se resumen a continuación:

○ **Paso 1: Recopilación de información y conformación de Línea Base**

Consiste en la consideración de la siguiente información

- Información hidrométrica, así como el área de las cuencas definidas por los puntos que delimitan el tramo. Es importante la flexibilidad en este paso, pues la escasez de información es frecuente en Colombia.
- Información hidráulica y de calidad del agua: Se sugiere la construcción de curvas de calibración sobre diferentes parámetros hidráulicos (Velocidades, profundidad, área, perímetro, ancho superficial) de diferentes subtramos del río. Esta información se obtiene normalmente a partir de datos obtenidos en campo como levantamientos de secciones transversales, experimentos con trazadores y la calibración de modelos hidráulicos y de transporte de sustancias disueltas. Así mismo, se debe hacer mediciones de carga de contaminante, concentración y tasas de reacción y/o transformación bioquímica.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Información de Índices de Integridad Biótica (IIB). Esta consiste en la determinación de la capacidad para soportar y mantener una comunidad de organismos balanceada, integrada y adaptable. Esta actividad se debe realizar para cada subtramo, en épocas secas y lluviosas. Aquí se pretende determinar la salud ecológica del sistema.
- **Paso 2: Análisis de consistencia, homogeneidad y calidad de la información hidrológica**

Se propone la utilización de alguna herramienta informática de análisis estadístico, como SPSS, XLSTAT, EDA, HidroSIG (menú de análisis de consistencia); con la que se evalúe la existencia de períodos no homogéneos, puntos anómalos y realizar el análisis de consistencia, eligiendo períodos homogéneos de más de 10 años de las series de caudales, corregidas según sea el caso. Además es necesario realizar la estimación estadística descriptiva de las series.

- **Paso 3: Análisis de correlación de la hidrología con los índices de fenómenos macroclimáticos**

Se debe realizar un análisis de correlación para determinar su incidencia en el área de estudio, considerando que en la escala interanual de la hidroclimatología del territorio colombiano, existe una alta influencia de diferentes fenómenos macroclimáticos como El Niño y La Niña (ENSO), La oscilación Quasi-Bienal (QBO), La Oscilación del Atlántico Norte (NAO), entre otros.

- **Paso 4: Clasificación de registros por condición hidrológica**

En caso en que las correlaciones dictaminen una alta influencia del ENSO, se propone clasificar los años en húmedo, promedio y seco, según se encuentra establecido en la Tabla de Consenso Internacional de años Niño y Niña. Luego, se deben calcular los caudales medios mensuales para los años clasificados; y a partir de estos, hacer la propuesta hidrológica mensual de caudales ambientales como se explica en el paso 6.

- **Paso 5: Cálculo de índices hidrológicos 7Q10 y Q95%**

Se requiere el cálculo del caudal presente el 95% del tiempo (Q95%) y el caudal mínimo semanal con período de retorno de 10 años (7Q10). Con estos, se hace la primera propuesta de caudales mensuales ambientales como el valor máximo entre estos dos índices para los 36 casos resultantes (12 meses y para los años secos, húmedos y normales).

- **Paso 6: Estimación iterativa de la propuesta mensual inicial de caudales ambientales**

En este paso se ajusta la propuesta del Paso 5 para cumplir con tres criterios que procuran conservar el régimen hidrológico de la corriente. Estos se resumen a continuación:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Limitar la alteración, estableciendo un umbral de 0,50 para la relación entre las curvas de duración de caudal sin y con proyecto para diferentes percentiles. Para esto es necesario la construcción de series hipotéticas de caudales medios post-intervención.
- Limitar la reducción de los caudales mínimos, para los períodos de retorno de 2, 5, 10 y 25 años, estableciendo una relación de 0,60 para las series de caudales pre y post-intervención.
- Evaluar integralmente el régimen hidrológico de la corriente a partir de una comparación de las condiciones con y sin proyecto. Se propone un análisis exploratorio y cualitativo por las limitaciones del desconocimiento de la regla de operación del proyecto, que puede ser realizado por rangos de variabilidad (RVA), con la implementación del software libre de The Nature Conservancy, llamado Indicators of Hydrologic Alteration (IHA).

○ **Paso 7: Cálculos hidráulicos, de calidad del agua y del Índice de Integridad del Hábitat (IIH)**

Aquí se pretende calcular diferentes parámetros hidráulicos para la propuesta de caudales ambientales. Para evaluarla es necesario el cálculo de diferentes factores de asimilación y compararlos en escenarios con y sin proyecto, para determinar si la existencia del proyecto impacta o no la calidad del agua, en magnitudes que restrinjan sus usos en el tramo de estudio. Además de esto, se evaluarán una serie de variables físicas y químicas que conforman un Índice de Integridad del Hábitat (IIH), que determinan la cantidad y calidad del hábitat para las comunidades bióticas.

○ **Paso 8: Revisión de la estimación inicial mensual de caudales ambientales**

A partir de los resultados del Paso 7 se llega a la determinación de aumentar o disminuir los caudales ambientales generados en el Paso 6, según sea el caso, cumpliendo con los criterios de calidad del agua y sin disminuir el IIH. Como resultado, se obtendrá finalmente, después de una iteración del Paso 7, la propuesta estimada de caudales ambientales mensuales para la licencia ambiental del proyecto.

○ **Paso 9: Evaluación del impacto ambiental durante la ejecución del proyecto**

Consiste en la evaluación periódica de los IIB para determinar los impactos generados por el cambio de régimen de caudales. Su resultado determinará la modificación o no de los caudales ambientales estimados en el Paso 8, evaluando primero si los impactos son externos o causados por el proyecto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1.4 CASOS DE ESTUDIO

1.4.1 Proyecto Hidroeléctrico Mayaba

El objetivo del Proyecto Hidroeléctrico Mayaba es el aprovechamiento de los caudales combinados de los ríos Porce y Nechí, en el punto donde confluyen. Este se pretende realizar mediante la construcción de un esquema a pie de presa (Figura 2), es decir, descargará sus aguas inmediatamente aguas-abajo de la cortina. La central está conformada por una presa en Concreto Compactado con Rodillo (CCR) de 35 m de altura, una conducción en acero y una casa de máquinas adosada a la presa. El proyecto aprovecha un caudal máximo de $700 \text{ m}^3/\text{s}$, con el que alcanza una potencia nominal del orden de 200MW. Se estima que durante la construcción de las obras se generará aproximadamente 2800 empleos directos en la región norte del departamento de Antioquia. La localización general del proyecto se presenta en la Figura 3.

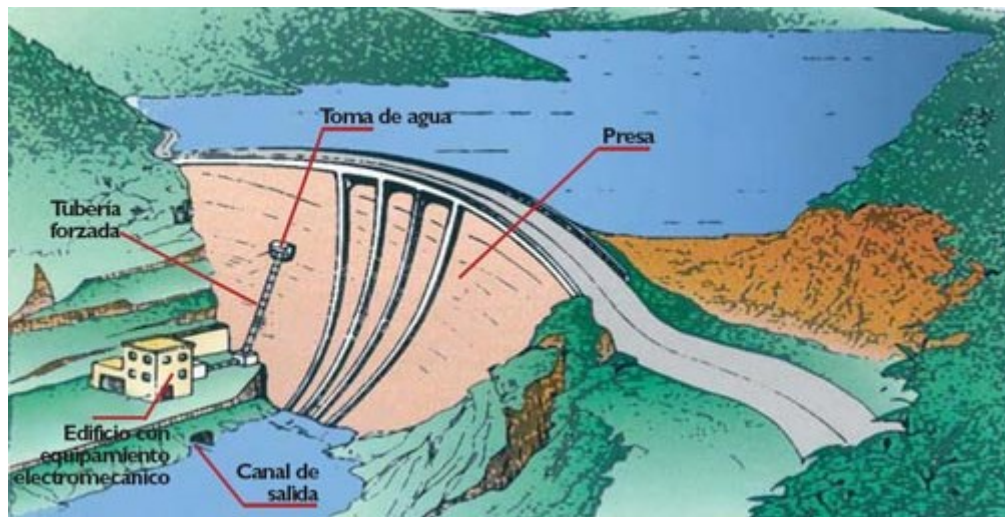


Figura 2 Esquema general de una central a pie de presa. (Ecovive, 2013)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Figura 3 Localización general del Proyecto Hidroeléctrico Mayaba.
Fuente: Google Earth

En el área de influencia directa del proyecto, los dos ríos corren por cañones profundos, estrechos y limitados por la estructura geológica. Por este motivo, el embalse formado por la presa tiene un volumen muy bajo, que considerando con el caudal de diseño de la central, resulta un tiempo de regulación menor a 24 horas; por lo tanto se clasifica como una central a filo de agua según la normativa colombiana. La consecuencia de tener esta condición es que la distribución temporal de los caudales, aguas-abajo de la intervención, es mínima o nula durante la etapa de operación de la central. Así mismo, los impactos drásticos sobre la hidrología tienen lugar en la etapa de llenado del embalse que, en este caso, tiene una duración entre 12 y 32 días, dependiendo del caudal ambiental y el mes en que se planifique.

Durante la operación de la central es necesario considerar una situación crítica, en la que el embalse no alcance la cota de la cresta del vertedero y ninguna unidad de generación se encuentre disponible. Si esta situación se presenta, es necesario considerar la permanencia de la corriente, aguas abajo de la presa. Por esto, se debe considerar una descarga de fondo que cumpla esta tarea mientras las condiciones regresan a la normalidad.

Por las razones expuestas, se identifica la necesidad de establecer dos diferentes regímenes de caudales ambientales: uno para el llenado del embalse y otro previsto para

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

contingencias durante la operación del proyecto. La segunda situación, por el carácter no regulador del proyecto y para no incurrir en períodos de vaciado y llenado del embalse, debe considerarse el caudal mínimo que se ha presentado en la corriente.

1.4.2 Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo

El Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo se encuentra localizado sobre el río de mismo nombre, en predios del municipio de Manzanares, ubicado en el oriente del departamento de Caldas. Esta zona montañosa es de gran producción hídrica, lo que representa condiciones favorables para el desarrollo hidroeléctrico. La región tiene un grado de desarrollo bajo, dado principalmente por el abandono del estado y el azote de grupos al margen de la ley, por lo que el proyecto representa una buena oportunidad para la población dada por el desarrollo de la infraestructura, los tributos que recibirían las entidades territoriales, los puestos de trabajo que se generarían y los servicios que prestarían las poblaciones a la construcción.



**Figura 4| Localización general del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo.
Fuente: Google Earth**

El proyecto está concebido como un esquema clásico de aprovechamiento a filo de agua tipo PCH (Figura 5). Este se compone por una captación de fondo ubicada sobre la cresta de un azud derivador en concreto, un canal de aducción, estructuras de sedimentación, un túnel de conducción a flujo libre, un tanque de carga, una conducción forzada, una casa de máquinas superficial y, por último, un canal de descarga que restituye de nuevo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

el agua al cauce. Su localización obedece al análisis del perfil energético del río, siguiendo criterios de optimización económica, ambiental y de aprovechamiento racional del recurso. Estos, en conjunto con criterios sociales y de máximo aprovechamiento de la infraestructura existente en la zona, permiten el planteamiento de un esquema de desarrollo sostenible y de producción limpia de energía eléctrica.

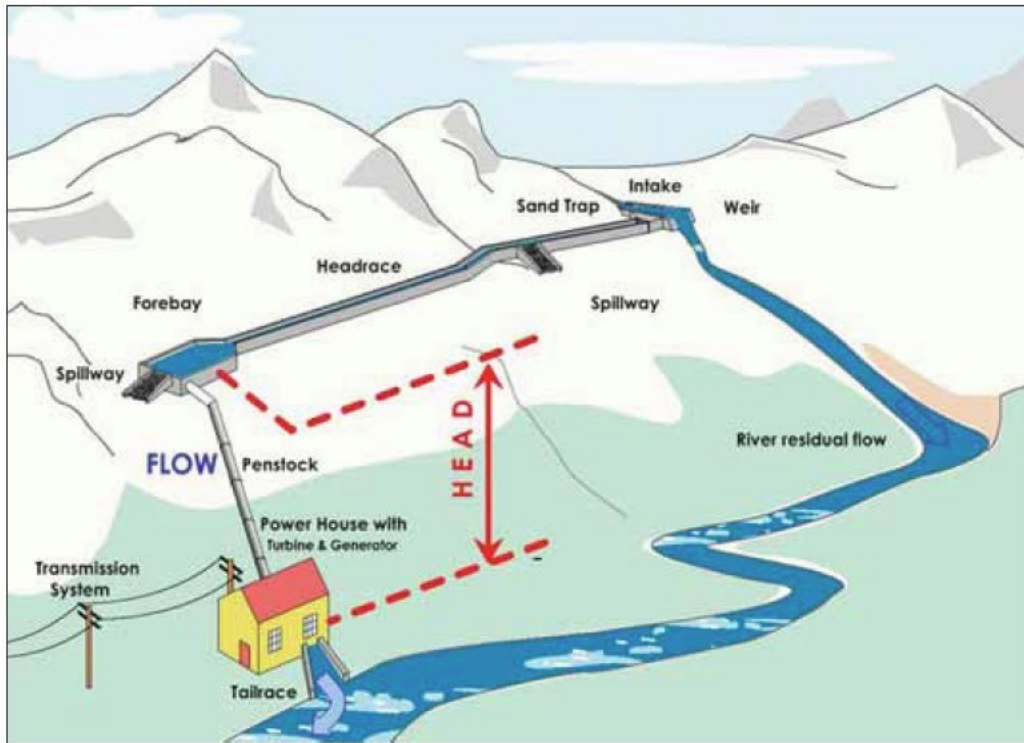


Figura 5 Esquema general de una PCH a filo de agua.
(Shalahuddin-Hasan, 2013)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta el procedimiento planteado para desarrollar las actividades presentadas a continuación, que son las necesarias para realizar el análisis de la aplicabilidad de los criterios físicos de la metodología MADS. Se ha hecho énfasis en los criterios hidrológicos de la misma.

Objetivo específico 1:

- Evaluación de la aplicabilidad de los criterios específicos de la zona de estudio.
- Evaluación de la aplicabilidad de los criterios hidrológicos.

Objetivo específico 2:

- Recopilación de información.
- Análisis de calidad, homogeneidad y consistencia.
- Análisis de correlación con índices macroclimáticos.
- Clasificación de registros por condición hidrológica.
- Cálculo de índices 7Q10 y Q95.

2.1 EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DE CRITERIOS HIDROLÓGICOS DE LA METODOLOGÍA MADS.

A continuación se presenta un análisis de los diferentes criterios que incluye la metodología y de los procedimientos propuestos por ésta para su cumplimiento, particularmente para los componentes físicos involucrados. Es necesario anotar que los autores de la metodología han expresado que, por los criterios de flexibilidad y adaptabilidad de la formulación, los procedimientos son propuestos y deben ser analizados para cada caso particular, respecto a su aplicación. Esto ha sido evidenciado en los diferentes talleres de socialización por parte de consultores y autoridades ambientales, puesto que algunos de los procedimientos tienen una aplicación limitada en Colombia.

2.1.1 Acerca del análisis de los criterios específicos de la zona de estudio

Los criterios específicos y de la zona de estudio, además de los correspondientes a los diferentes tipos de aprovechamientos, son muy importantes en el establecimiento de un régimen de caudal ambiental. Esto es, los impactos generados por los proyectos dependen de las características del aprovechamiento y de las particularidades naturales de la zona de ubicación.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Los criterios específicos de la zona de estudio de la metodología de MADS comprenden las características del aprovechamiento sobre la corriente, la definición del tramo afectado y la identificación de los usos actuales y futuros del agua; si bien, son criterios que se mencionan, mas no se detallan ni se incluyen en los procedimientos estipulados en la metodología para la estimación de caudal ecológico.

La importancia de incluir los criterios específicos de la zona en el análisis para la estimación de caudal ambiental radica en que los posibles impactos que puedan generar proyectos hidroeléctricos dependen de la tipología de aprovechamiento, de las condiciones abióticas geomorfológicas y climatológicas de la zona de estudio, entre otros factores.

Por lo anterior, y dada la importancia de dichos criterios, se considera que se debe analizar de forma diferente los caudales ambientales dependiendo del tipo de proyecto, de la geomorfología fluvial y la densidad de drenaje de la hoya afectada. Debido a esto, se analizó la capacidad de recuperación de la hoya afectada, representada en el rendimiento hídrico medio de la cuenca, como un activo ambiental que puede ayudar a determinar el caudal ambiental.

2.1.2 Acerca del análisis a los criterios hidrológicos

Los criterios hidrológicos se refieren a las características de la información hidrológica, la agregación temporal, magnitud, duración y frecuencia de los caudales ambientales, que sin dudas se relacionan a los caudales mínimos de las corrientes. En general, como lo indican diferentes autores, la información hidrológica en Colombia tiene una mala calidad y cobertura. Sin embargo, los autores de la metodología exponen que la información utilizada para dichas estimaciones debe de ser de una calidad difícil de encontrar en nuestro país. Además de esto, para definir la magnitud, duración, frecuencia del régimen de caudales ambientales se basa en copias de metodologías utilizadas en otras latitudes, que tienen objetivos ambientales, de desarrollo y condiciones naturales muy diferentes a las presentes en el país, además que se enfocan en tipos específicos de proyectos (con embalse de regulación). Esta problemática se pretende evidenciar mediante los procedimientos presentados a continuación.

○ Longitud y disponibilidad de registros

Con el fin de analizar la pertinencia en los requerimientos de información en proyectos hidroeléctricos se realizó una verificación de la ubicación geográfica de la información disponible para la formulación de los aprovechamientos. Para esto, se hizo uso de la base de datos de las 1.309 estaciones limnimétricas y limnigráficas disponibles en el IDEAM. Adicionalmente se digitalizó el contorno correspondiente al Potencial Hidroenergético Medio-Alto, disponible en el mapa de potencial físico cualitativo elaborado por la UPME y el IDEAM que se muestra en la Figura 2.

Es necesario aclarar que este potencial solo se refiere al físico (salto y caudal) y no toma en cuenta variables determinantes para la formulación de proyectos hidroeléctricos como lo son la facilidad de acceso, las condiciones socio-ambientales del área y las variables

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

físicas (relación de salto/longitud de conducciones, rendimientos hídricos confiables, longitud y tipo de conducciones, geotecnia, etc.) que determinan la viabilidad económica. Lo anterior debe ser considerado en la formulación de proyectos y constituye un filtro adicional para dichas estaciones. Sin embargo, mediante este análisis se puede tener una idea de la cantidad de estaciones de medición de caudal que está disponible para su uso en los estudios preliminares de un aprovechamiento hidroeléctrico.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

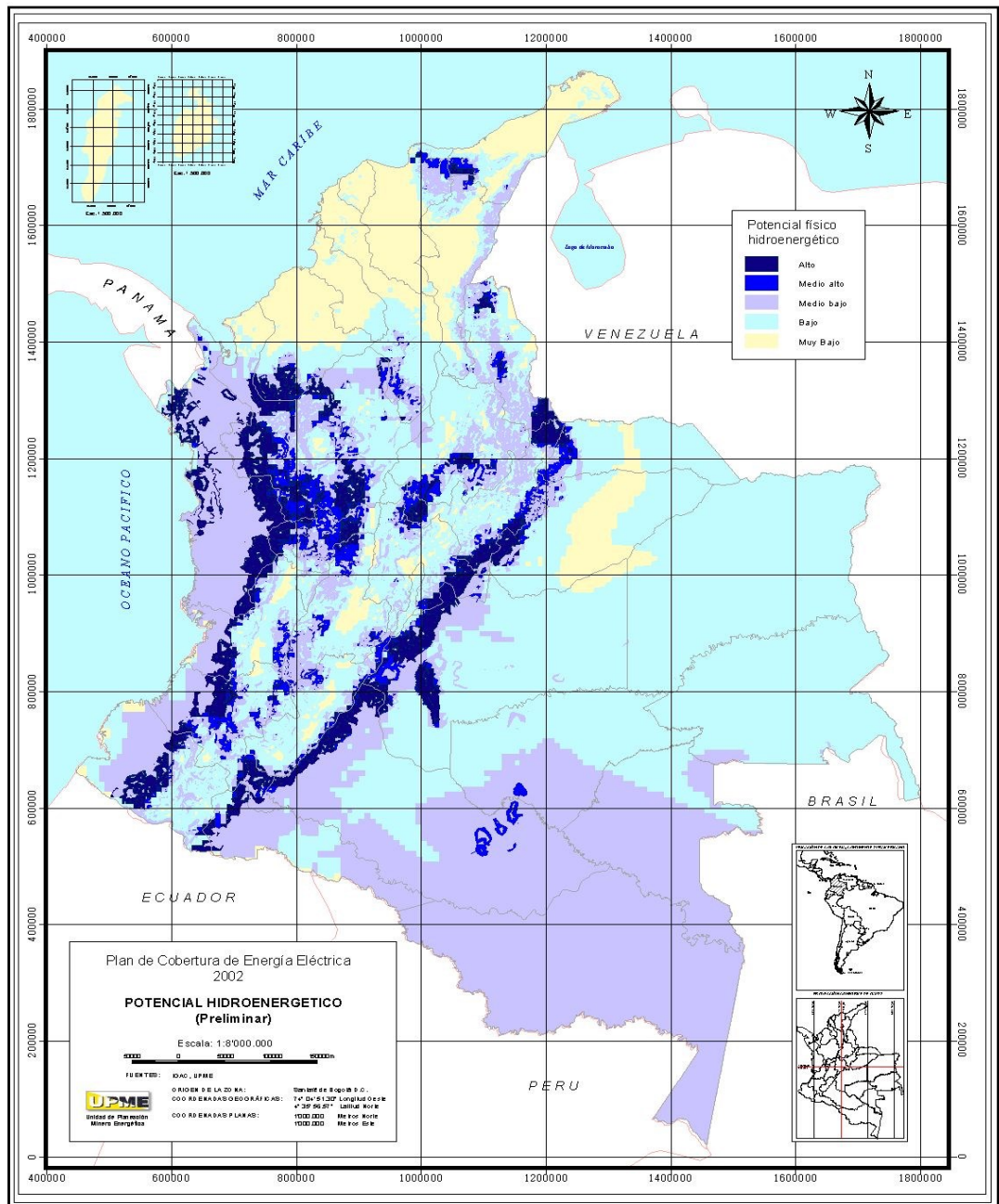


Figura 6 Mapa de Potencial Hidroenergético de Colombia. (UPME, 2002)

Posteriormente se realizó, mediante la aplicación de un sistema de información geográfico (ArcGIS), la superposición de capas (potencial vs estaciones de caudal) para poder

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

identificar la cantidad de estaciones disponibles en el IDEAM que se localizan en sitios con potencial hidroenergético por lo menos medio-alto.

Una vez identificadas las estaciones de interés para formular un proyecto hidroeléctrico, se procede a determinar la cantidad de estaciones con más de 10 años de período de registro. Estas son las que, *a Priori*, podrían ser utilizadas para la aplicación de la metodología del MADS en proyectos hidroeléctricos.

○ **Calidad, Homogeneidad y Consistencia**

Se verificó la calidad de la información de 39 estaciones de caudal suministradas por la empresa I-Consult SAS, que han sido adquiridas al IDEAM (Tabla 1). Para esto, se hizo uso de la herramienta XLSTAT para los análisis de homogeneidad y consistencia de las series de caudal a nivel mensual, derivadas de las series de medición diaria de las estaciones. A continuación se describe la metodología utilizada por el software para las pruebas.

Tabla 1 Estaciones de caudal suministradas por I-Consult SAS

N°	Nombre	Código	Corriente	Fecha Inicial	Fecha Final	N° Años	% de faltantes
1	Albania	2618718	Arma	1994	2001	8	15,10%
2	Bocatoma	21217250	Cay	1985	2009	25	3,60%
3	Butantán	2305708	Samaná Sur	1967	2003	37	34,40%
4	La Dabeida	1111705	Río Sucio	1976	2005	30	8,20%
5	Puente Carretera	15027010	Don Diego	1990	2010	21	4,40%
6	El Añil	1111701	Río Sucio	1972	2005	34	10,40%
7	El Cangrejo	2621704	San Mateo	1979	2005	27	40,20%
8	El Portento	4-157-1	Guarinó	1999	2004	6	27,30%
9	La Herencia	26187170	Arma	1994	2009	16	49,50%
10	La Tabeida	4-155	Pensilvania	1972	2003	28	32,90%
11	Las Playas	2302705	Guarinó	1995	2004	10	5,40%
12	Montezuma	21217180	Combeima	1980	2009	30	1,90%
13	Mutata	1111704	Río Sucio	1976	2005	30	31,60%
14	Nemizaque	2402703	Pienta	1971	2005	35	1,90%
15	Pena de los Micos	37027010	Margua	1972	2009	38	15,40%
16	Pte Anorí	2702709	Nechí	1975	2005	31	6,00%
17	Puente Carretera	4-916	Perrillo	1998	2004	7	17,10%
18	Puente Carretera	4-919	Santo Domingo	1995	2004	10	13,70%
19	Puente Carretera	2302706	Guarinó	1980	2007	28	15,40%

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

N°	Nombre	Código	Corriente	Fecha Inicial	Fecha Final	N° Años	% de faltantes
20	Puente Linda	2305709	Samana Sur	1969	2002	34	8,40%
21	Puente Marquetalia	2305712	La Miel	1994	2002	9	7,40%
22	Puente Mulas	2110702	Neiva	1987	2007	21	4,20%
23	Rotambria	37037020	Cobugón	1980	1990	11	56,80%
24	San Juan	2703703	Nechí	1976	2010	35	46,40%
25	Tascon	1111703	Río Sucio	1977	1999	23	49,70%
26	Bocatoma	21217230	Qda la Plata	1993	2000	8	69,10%
27	California	21217210	Quebrada Perlas	1995	2002	8	16,80%
28	El Chuzo	21217270	Amaime	1986	2009	24	19,90%
29	Juntas	21217190	Quebrada Perlas	1998	2002	5	6,00%
30	La Miel	2305711	La Miel	1978	2003	26	3,20%
31	La Suecia	2302703	Guarinó	1998	2004	7	21,40%
32	Los Pomarrosos	16027010	Río Salazar	1988	2010	23	40%
33	Puente Carretera	4-159	Tenerife	1994	2001	8	12,50%
34	Puente La Bolívar	21217280	Arma	1993	2009	17	10,00%
35	Puente Luisa	21217140	Anaime	1985	2009	25	10,30%
36	Quibdó	1104701	Atrato	1984	2009	26	25,50%
37	San Vicente	21217220	Quebrada Perlas	1984	2008	25	11,20%
38	Venaga	37017050	Chitagá	1972	2009	38	3,10%
39	Tres y Medio	27027070	Nechí	1974	1990	17	11,00%

Homogeneidad

Para detectar los cambios en la media se usa la prueba de Pettitt (López Díaz, 2004). Esta es una prueba no paramétrica, donde a partir de los rangos (r_i) de las series se calcula el estadístico X_k como sigue:

$$X_k = 2 * \sum_{i=1}^k r_i - k * (N + 1); \quad k = 1, \dots, N$$

Dónde: N: Tamaño de la muestra

Siendo el punto de cambio el período donde el valor del estadístico es máximo o mínimo y comparándolo con un estadístico de prueba (distribución normal estándar) en función del nivel de significancia recomendado.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La forma de llegar a la solución es mediante un número finito de simulaciones de Monte-Carlo, variando los rangos aleatoriamente hasta encontrar o no la X_k crítica.

Consistencia

La consistencia se analizó mediante la prueba de tendencia Mann-Kendall, que se basa en el cálculo del estadístico S definido como sigue (Cantor Gómez & Ochoa Jaramillo, 2011):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

$$\text{Si } (x_j - x_i) > 0 \quad \text{sgn}(x_j - x_i) = 1$$

$$\text{Si } (x_j - x_i) = 0 \quad \text{sgn}(x_j - x_i) = 0$$

$$\text{Si } (x_j - x_i) < 0 \quad \text{sgn}(x_j - x_i) = -1$$

Dónde:

- n es el tamaño de la muestra
- x_j y x_i corresponden a datos secuenciales

El estadístico S tiene una distribución normal, si la muestra es grande, con media cero y varianza evaluada para t grupos:

$$V(S) = \frac{n(n-1)(Zn+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18}$$

Luego, se procede a definir el estadístico estandarizado Z_{MK} :

$$\text{Si } S > 0 \quad Z_{MK} = \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}}$$

$$\text{Si } S = 0 \quad Z_{MK} = 0$$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$\text{Si } S < 0 \quad Z_{MK} = \frac{S + 1}{\sqrt{V(S)}}$$

Este último (Z_{MK}), comparado con la distribución normal estándar, con el nivel de significancia deseado, define si se rechaza o se acepta la hipótesis nula (H_0 , no hay tendencia en la serie).

- **Índices hidrológicos y alteración máxima de la curva de duración de caudales**

Para determinar la aplicabilidad de estos criterios se realizó una revisión bibliográfica de documentos escritos por los autores que proponen los índices 7Q10, Q95 y los umbrales de alteración máxima de la curva de duración de caudales. Con lo anterior se verificó que las condiciones naturales de las zonas donde fueron propuestos los índices y umbrales, además de los criterios y objetivos de su desarrollo, fueran compatibles en el contexto colombiano y para cualquier tipo de proyecto.

2.2 ESTIMACIÓN DE LOS CAUDALES AMBIENTALES

En esta etapa se realizó la estimación de los caudales ambientales para los casos Mayaba y Santo Domingo, siguiendo los pasos 1 a 5, correspondientes a la hidrología de la Metodología MADS, considerando las observaciones realizadas en la etapa anterior. Aquí se recalca la importancia de una futura definición de índices hidrológicos para Colombia, pues los actuales no son aplicables. Estos deben surgir de la relación de algún estimador probabilístico o de frecuencia de la hidrología con criterios biológicos, que no son tema de este trabajo. Los umbrales de alteración máxima, tanto de las curvas de duración de caudales, como de los caudales mínimos, es decir, el paso 6, no se tuvo en cuenta, pues no existe fundamentación para ello. Tampoco se tuvo en cuenta el software IHA porque su aplicación está enfocada para proyectos con objetivos de regulación de caudales, que no es el caso de ninguno de los proyectos considerados.

2.2.1 Paso 1: Recopilación de información

Se hizo uso de las estaciones presentadas en la Tabla 2 y en la Tabla 3 para el Proyecto Hidroeléctrico Mayaba y para el Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo, respectivamente.

Tabla 2 Estaciones de caudal utilizadas para la estimación del caudal ambiental en el Proyecto Hidroeléctrico Mayaba

Nombre	Código	Tipo	Corriente	Fecha Inicial	Fecha Final	Nº Años
San Juan	2703703	LG	Nechí	1976	2010	35
Tres y Medio	27027070	LG	Nechí	1974	1990	17

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 3 Estaciones de caudal utilizadas para la estimación del caudal ambiental en el Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo

Nombre	Código	Tipo	Corriente	Fecha Inicial	Fecha Final	N° Años
Puente Carretera	4-919	LG	Santo Domingo	1995	2004	10
Puente Carretera	2302706	LG	Guarinó	1980	2007	28

Para el caso del Proyecto Hidroeléctrico Mayaba, ninguna de las estaciones de caudal cumplen con los requisitos sobre períodos mínimos con una longitud de registros de 10 años y que tuviera menos del 10% de datos faltantes, por lo que se realizó un relleno de la estación San Juan con los registros de la estación Tres y Medio que se ubica sobre el río Nechí, aguas arriba de su confluencia con su principal tributario (el río Porce), mediante una regresión lineal por mínimos cuadrados debidamente justificada con la prueba F (la correlación no es dada por el azar).

Por otra parte, el río Santo Domingo, donde se ubica el proyecto de mismo nombre, es una corriente poco instrumentada por lo que se recurre al método de transposición de caudales de la estación Puente Carretera del río Guarinó, del que es tributario. Puede emplearse este método porque las dos cuencas objeto de análisis se consideran de condiciones hidrológicas semejantes. La transposición consiste en trasladar los datos de los caudales del río Guarinó al Santo Domingo multiplicando cada registro por un Factor de Transposición por áreas y precipitación efectiva como se indica a continuación:

$$\text{Factor de transposición} = \frac{\text{Área}_{\text{cuenca desconocida}} * \text{Precipitación efectiva}_{\text{cuenca desconocida}}}{\text{Área}_{\text{cuenca conocida}} * \text{Precipitación efectiva}_{\text{cuenca conocida}}}$$

Donde la precipitación efectiva corresponde a la diferencia entre la precipitación normal (total anual) y la evapotranspiración total real. Estas variables fueron identificadas en el Atlas Hidrológico de Colombia (HidroSIG 4.0) (Álvarez, 2007), (Álvarez-Villa, Vélez, & Poveda, 2010) que es una aplicación desarrollada en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y funciona sobre la plataforma SIG MapWindow, a partir del mapa de precipitación interpolado con el método Krigin con Deriva Externa (KDE) y de evapotranspiración de Turc, disponibles en su base de datos.

2.2.2 Paso 2: Análisis de consistencia y homogeneidad de la información hidrológica

Para los análisis de consistencia se ejecutó la prueba de tendencia de Mann-Kendall, y para la homogeneidad, la prueba de cambios en la media de Pettitt, como se describen en el numeral 2.1.2, en el título correspondiente a cada prueba.

2.2.3 Paso 3: Análisis de correlación de la hidrología con los índices de fenómenos macroclimáticos

Se analizó la correlación con el fenómeno ENSO (El Niño Southern Oscillation), dado que es el fenómeno macroclimático de mayor incidencia en la variación interanual del clima colombiano (Poveda, 2004). El análisis se realizó mediante la ejecución de correlogramas de las series de caudales promedio mensuales y cuatro diferentes índices relacionados con el fenómeno. Los índices que describen mejor el fenómeno para Colombia (Carrascal, 2013) son: Southern Oscillation Index (SOI), Southern Oscillation Index Anomaly (SOI Anomaly), la temperaturas oceánicas en la región Niño 1+2 (SST Niño 1+2) y por último la anomalía del registro anterior (SST Niño 1+2 Anomaly). Los registros de los índices anteriores fueron consultados en la página de internet: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2013).

La correlación se analizó mediante la construcción de un correlograma para cada índice. Este procedimiento consiste en obtener el coeficiente de correlación de un ajuste por mínimos cuadrados, aplicando rezagos para los índices de 0 a 6 meses. Así se obtiene el rezago que mejor se ajusta a la serie de caudales, cuya regresión se revisa mediante la prueba F para determinar si la relación entre las dos variables (índice-caudal) es dada o no por el azar. De este modo, se demuestra si existe un efecto del fenómeno sobre los caudales.

2.2.4 Paso 4: Clasificación de registros por condición hidrológica

Dada la influencia del fenómeno ENSO sobre las series de caudales, se realizó la clasificación de los registros en años Niño, Normal y Niña según la Tabla 4, con el fin de realizar la propuesta hidrológica mensual para el régimen de caudales ambientales. Los años corresponden al año hidrológico, es decir, empieza el primero de junio y termina el 31 de mayo.

Tabla 4 Consenso Internacional del Niño. WRCC: Western Regional Climate Center, CDC: National Climate Data Center, CPC: Climate Prediction Center, MEI: Multivariate Enso Index, C: Fase fría, W: Fase cálida, “+” ó “-“ indican severidad

Invierno	WRCC	CDC	CPC	MEI	Consenso
1950-51	C+	C	C	C	La Niña
1951-52	W+		W-		
1952-53					
1953-54	W		W-		
1954-55			C	C-	
1955-56	C+		C+	C-	Fuerte La Niña
1956-57	C		C-	C-	Suave La Niña
1957-58	W	W	W+	W	El Niño
1958-59			W+	W-	
1959-60					
1960-61					
1961-62				C-	
1962-63				C-	
1963-64	W		W-		
1964-65	C		C	C-	La Niña
1965-66	W+	W	W	W	El Niño
1966-67				C-	
1967-68				C-	
1968-69			W	W-	
1969-70	W		W		
1970-71	C		C		La Niña
1971-72	C		C-	C-	Suave La Niña
1972-73	W+	W	W+	W	Fuerte El Niño
1973-74	C+	C	C+	C+	Fuerte La Niña
1974-75	C		C-	C-	Suave La Niña
1975-76	C+	C	C+	C	Fuerte La Niña
1976-77	W		W-		
1977-78	W+		W-	W-	El Niño
1978-79					
1979-80			W-	W-	
1980-81					
1981-82					

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Invierno	WRCC	CDC	CPC	MEI	Consenso
1982-83	W+	W	W+	W+	Fuerte El Niño
1983-84			C-		
1984-85			C-	C-	
1985-86					
1986-87			W	W	
1987-88	W+	W-	W	W-	El Niño
1988-89	C+	C-	C+	C	Fuerte La Niña
1989-90					
1990-91			W+		
1991-92	W	W	W+	W+	Fuerte El Niño
1992-93	w		W+	W-	El Niño
1993-94	W+		W		
1994-95	W+		W	W-	El Niño
1995-96			C-	C-	
1996-97					
1997-98	W+	W	W+	W+	Fuerte El Niño
1998-99	C+		C	C-	La Niña
1999-00			C	C	
2000-01	C	C	C-	C-	La Niña
2001-02					
2002-03	W	W	W	W	El Niño

Fuente: Null (2004) citado por Grupo de Investigación en Recursos Hídricos (2008).

2.2.5 Paso 5: Cálculo de índices hidrológicos 7Q10 y Q95%

En este paso se consolida la propuesta mensual de caudales ambientales, para los años Niño, Niña y Normal. Es de anotar que estos índices no han sido desarrollados en el contexto colombiano, pero se calculan porque no existe ningún índice hidrológico que sea válido y aplicable a las corrientes de nuestro país.

En general, el mayor de los dos índices para cada mes consiste en la propuesta mensual de caudal ambiental.

- **Caudal mínimo semanal con 10 años de período de retorno (7Q10)**

El Grupo de Investigación en Recursos Hídricos (2008) indica que este índice se calcula teniendo en cuenta todo el período de registro. Para el caudal semanal, se calculó una media móvil con ventana de siete días para toda la serie. Luego, se filtraron año a año los caudales mínimos semanales. Finalmente se realizó un análisis de frecuencias, ajustando

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

los datos a funciones de probabilidad Gumbel y LogNormal, como se describe a continuación (Chow, Maidment, & Mays, 2000) (EIA, 2013):

$$x_{Tr} = \mu \pm K_{Tr} * \sigma;$$

$$K_{Tr} = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.5772 - \ln \left[\ln \left(\frac{Tr}{Tr-1} \right) \right] \right\} \text{ Gumbel};$$

$$K_{Tr} = \frac{\text{Exp} \left\{ \text{DistrNormEst}^{-1} \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) * \left(\ln(1+Cv^2) \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{\ln(1+Cv^2)}{2} \right) \right\} - 1}{Cv} \text{ Lognormal};$$

$$Cv = \frac{S}{\bar{X}} \text{ Coeficiente de variación}$$

Dónde: x_{Tr} : Caudal mínimo o máximo para un período de retorno Tr.

μ, σ : Media y desviación estándar de la población

K_{Tr} : Factor de frecuencia para un período de retorno y una función de distribución de probabilidad conocida. Se presentan a continuación para las distribuciones de probabilidad seleccionadas (LogNormal y Gumbel)

Lo anterior se puede estimar de una muestra sustituyendo la media y la desviación estándar de la población por la de la muestra (S, \bar{X}).

○ **Caudal con 95% de probabilidad de excedencia (Q95)**

Para el caudal presente el 95% del tiempo (Q95) se utilizaron las series clasificadas por mes y condición hidrológica. Los datos de cada mes se ordenaron de mayor a menor y se obtuvo la distribución empírica de la muestra, calculando la probabilidad de excedencia de Weibull (EIA, 2013) como se indica a continuación y que es posible obtener mediante la función PERCENTIL.INC de Microsoft Excel:

$$P_{exc} = \frac{m}{n+1}, \text{ Donde } m \text{ es el índice de orden y } n \text{ es el tamaño de la muestra.}$$

La probabilidad anterior, graficada junto con el caudal correspondiente constituye la Curva de Duración de Caudales (CDC).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados de la ejecución de las diferentes actividades descritas en el Capítulo 2. Estos comprenden la evaluación de la aplicabilidad de los criterios hidrológicos de la metodología MADS para luego estimar los caudales ambientales en dos casos de estudio: Mayaba y Santo Domingo.

Lo anterior constituye el aporte realizado a este trabajo, que se enmarca en la aplicación crítica de la metodología MADS para estimación de caudales ambientales. Esta contribución permitirá que los profesionales conozcan los diferentes problemas a los que se pueden enfrentar, en el campo de la Gestión de Recursos Hídricos y en la Planeación de Proyectos Hidroeléctricos.

3.1 EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DE CRITERIOS HIDROLÓGICOS DE LA METODOLOGÍA MADS

3.1.1 Criterios específicos de la zona de estudio

Un aspecto que vale la pena considerar en la estimación de caudales ambientales es la capacidad de recuperación de la hoya afectada. Esta variable está dada por la densidad de drenaje (relación entre la longitud de canales y el área de la cuenca o la hoya), y define la capacidad que tiene la cuenca, aguas abajo de la extracción, de recuperar parte del caudal y así lograr una mayor permanencia de la corriente en el tramo afectado. Esta particularidad natural depende de diferentes factores, como lo son la geomorfología, la geología y el clima de cada cuenca, por lo que es diferente para cada río. Si la capacidad de recuperación es alta, entonces constituye un activo ambiental que puede ser aprovechado. En cambio si esta variable es baja, entonces quiere decir que la corriente es más sensible a la falta de caudal, por lo que su caudal ambiental debe tener una mayor magnitud.

Es por lo anterior que se propone analizar los caudales ambientales de forma diferenciada para las diferentes capacidades de recuperación y de esta forma lograr una mayor coherencia en la estimación de dichos caudales con la diversidad de las cuencas colombianas.

Con el objetivo de adaptar la metodología a una escala regional, se pretende incorporar un criterio hidro-geográfico en la concepción metodológica propuesta. Para ello se evaluó la posibilidad de incorporar la densidad de drenaje como criterio. Sin embargo, al analizar la complejidad en la estimación adecuada de dicha variable, se encontraron las siguientes dificultades:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- **Problemas de escala:** la identificación de las diferentes corrientes superficiales dependen del detalle de la información primaria, por lo tanto si se cuenta con información en diferentes escalas espaciales, la longitud de drenaje no podría asociarse de manera adecuada a una escala espacial.
- **Umbral de formación de cauce:** se han planteado soluciones, algunas más complejas que otras, para la estimación de los sitios a partir de los cuales se forman las corrientes superficiales (nacimientos). Estas metodologías plantean una dependencia espacio-temporal entre la localización de dichos sitios y otras variables hidrológicas, geomorfológicas y biológicas (coberturas vegetales), y se basan en información satelital para validar los resultados. Esto plantea una gran dificultad para su implementación en la extracción de las redes de drenaje.
- **Dependencia en otras variables:** la estructura espacial de las redes de drenaje de la región geográfica estudiada depende en un alto grado de las condiciones geológicas, geomorfológicas, climatológicas, cobertura vegetal y de la interacción entre ellas. Esto representa un gran problema al momento de plantear criterios de extracción de la red de drenaje basados en estas variables.

Por estas razones se optó por descartar la inclusión de la densidad de drenaje como criterio e incluir el rendimiento hídrico, definido como la relación entre el caudal medio y el área de la cuenca, en la metodología de estimación de caudales ambientales. Las razones para la inclusión de dicho parámetro se presentan a continuación:

- Depende únicamente de 3 variables: el área de la cuenca hidrográfica, la precipitación total multianual y la evapotranspiración total multianual.
- La incertidumbre en la delineación de las cuencas (estimación del área de la cuenca) es mucho menor que en la identificación de la red de drenaje.
- La cuenca como unidad básica, de forma conjunta con el caudal medio de largo plazo, sintetiza el comportamiento hidrológico de la región de estudio, el cual es la respuesta del sistema a la interacción de los factores climatológico, geológico, geomorfológico.

De esta manera se plantea que según el rendimiento hidrológico de la región de estudio se pueden variar los criterios tenidos en cuenta para la estimación de los caudales ambientales.

Para el cálculo de las regiones de iso-rendimientos, se utilizó la información de las bases de datos HYDROSHEDS (Mapas de acumulación de flujo y de direcciones de 500 m de resolución) e HidroSIG (Mapas de Precipitación KDE y evapotranspiración de Turc) y se siguió el procedimiento descrito a continuación:

- A partir del mapa de acumulación de flujo se extrajo una red sintética de drenaje, utilizando un área de 20 km² como umbral de formación de cauce.
- Con los “nodos” finales de cada tramo de corrientes se trazaron subcuencas y se calcularon sus respectivas áreas.
- Se integró espacialmente la precipitación efectiva sobre cada unidad hidrológica y se estimó el caudal medio de largo plazo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Dividiendo el caudal medio de largo plazo entre el área de cada cuenca se obtuvieron los rendimientos hidrológicos para cada una de las subcuencas.
- Según la distribución probabilística de los rendimientos (histograma) se definieron las iso-regiones mostradas en la Figura 7.

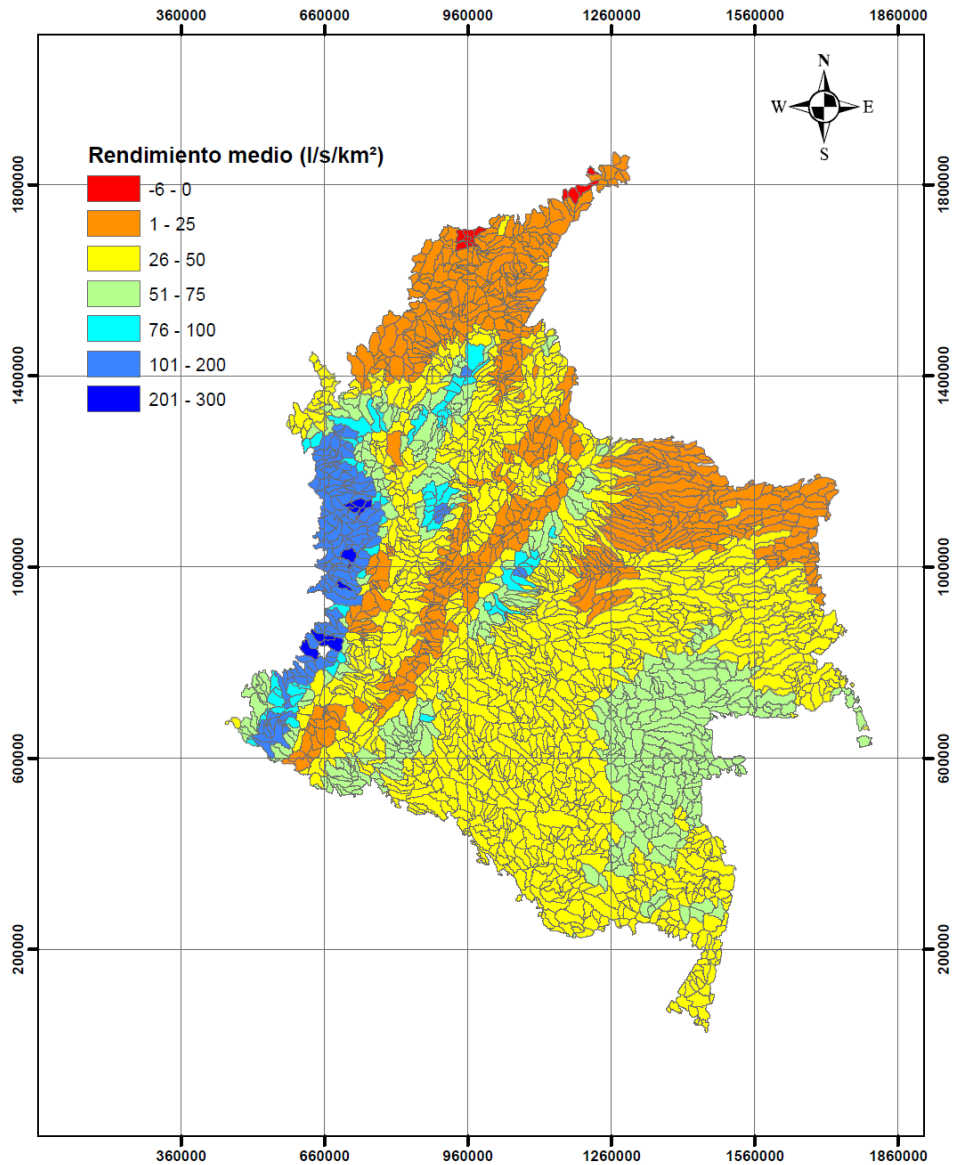


Figura 7 Mapa de clasificación regional de rendimientos hídricos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Como resultado, se obtiene una clasificación regional por rendimientos hídricos. Es de esperarse que regiones con altos rendimientos tengan una capacidad de recuperación alta, y que sean de menor sensibilidad a los impactos que puedan ocasionar extracciones de caudal en las corrientes. En cambio, se estima que las regiones con rendimientos menores sean de una alta sensibilidad a extracciones de caudal, pues debe recorrerse una mayor longitud en el cauce para lograr una recuperación natural del caudal.

Igualmente, las regiones que presentan los mayores rendimientos hídricos son las que tienen algún potencial de aprovechamiento hidroenergético, considerando variables topográficas. Este aspecto puede evidenciarse comparando la Figura 7 con la Figura 6, en donde se aprecia una relación directa entre regiones con mayor potencial hidroenergético y las que tienen mayor rendimiento hídrico, diferenciándose por las variables topográficas.

Se plantea que para cada una de estas regiones se deben modificar los criterios utilizados en la metodología de estimación de caudal ambiental función directa del rendimiento medio de la cuenca. Por tanto, será necesario plantear unos valores de afectación a los índices hidrológicos, que sean congruentes con criterios biológicos. Si bien se reconoce esta falencia en la metodología del MADS, la propuesta de mejora involucra un alcance superior a la de este trabajo de grado, por lo que se deja abierta a discusión y a investigación futura.

3.1.2 Criterios Hidrológicos

- **Longitud y disponibilidad de registros**

En la Figura 8 se presenta el mapa que contiene las 1309 estaciones limnimétricas y limnigráficas disponibles en el IDEAM, como también el contorno del potencial hidroenergético medio-alto y alto que parte del análisis físico-cualitativo realizado por la UPME y el IDEAM (2002) (Figura 6). Las 234 estaciones que se encuentran dentro del contorno son las apropiadas para realizar la formulación y evaluación de proyectos hidroeléctricos en Colombia, por lo que son las disponibles para la aplicación de la metodología de estimación de caudales ambientales adoptada por el MADS en este tipo de aprovechamientos.

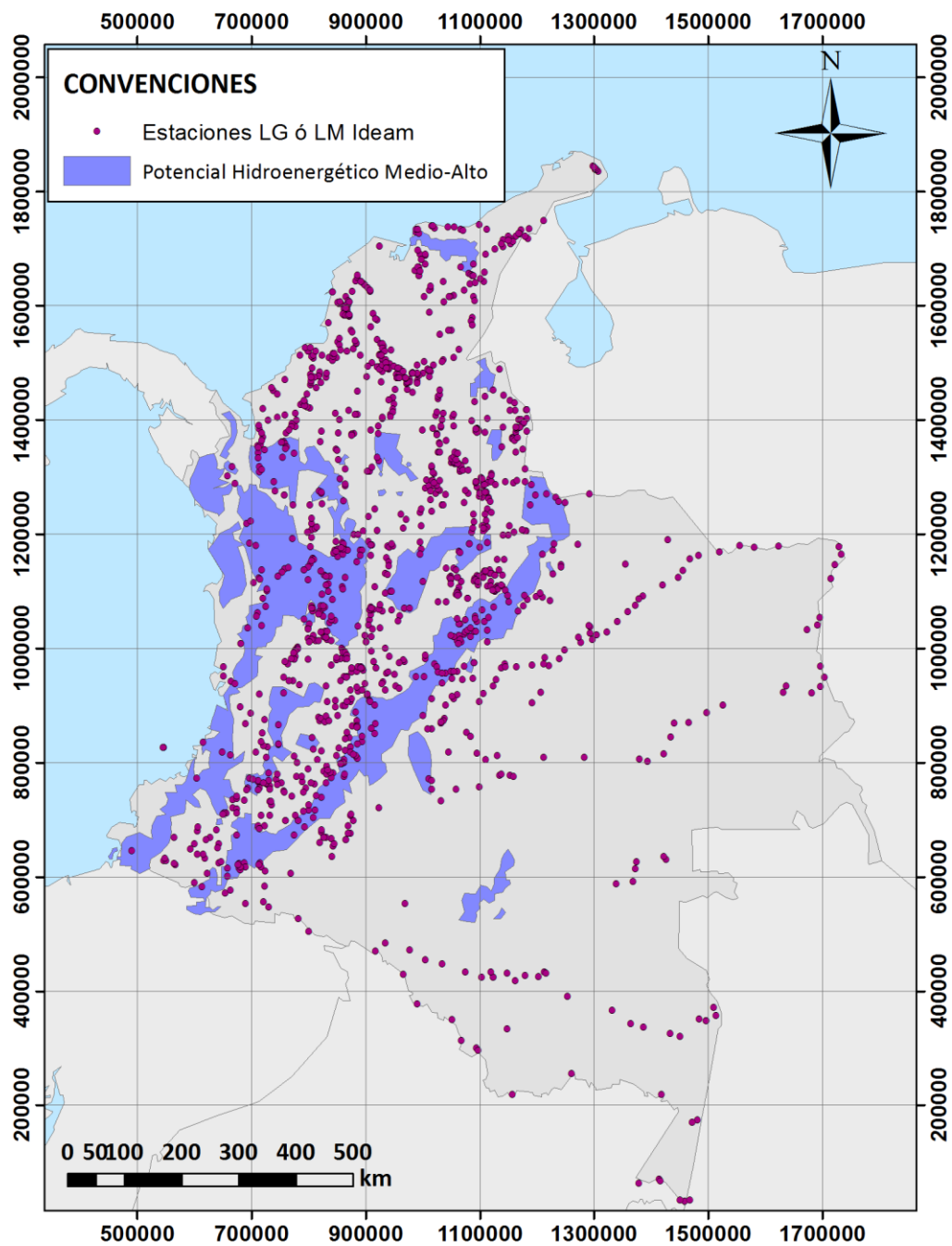


Figura 8 Estaciones limnimétricas y limnigráficas del IDEAM, y región con Potencial Hidroenergético Medio-Alto. Elaboración propia.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La Figura 9 ilustra la cantidad de estaciones (ordenada) que cuentan con un período máximo de registros (abscisa). En ésta se identifica que el 90,6% de las estaciones de medición de caudal disponibles en el IDEAM, que además se encuentran en una región con algún potencial hidroeléctrico, cuentan con más de 10 años de período de registro. Es decir, de las 234 estaciones apropiadas para la formulación de proyectos hidroeléctricos, 212 cumplen el período mínimo de registro para ser usada en metodología de estimación de caudales ambientales del MADS.

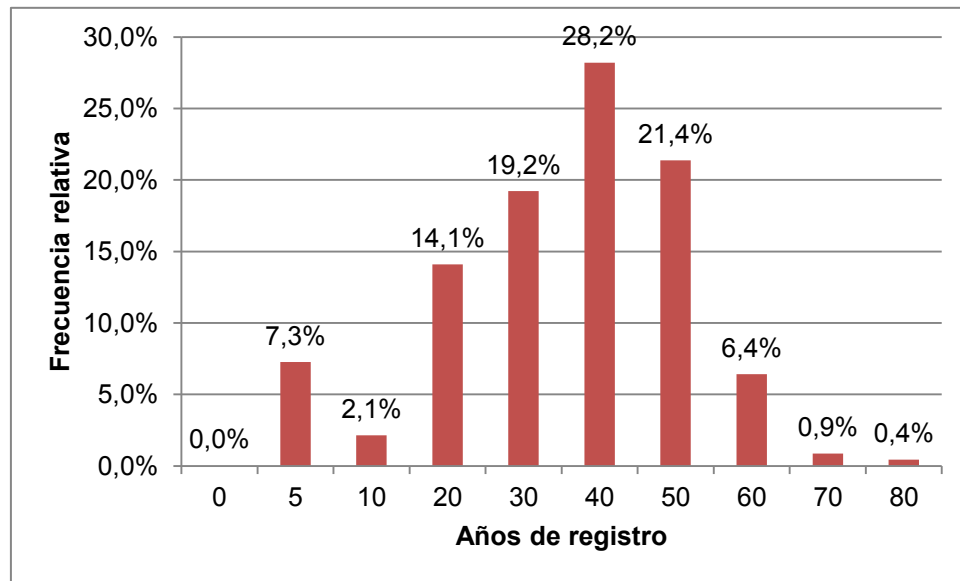


Figura 9 Histograma de frecuencias de los años de registro de las estaciones de caudal del IDEAM

En este análisis no se tiene en cuenta la calidad de la información requerida respecto a homogeneidad, consistencia y existencia de períodos de 10 años con menos del 10% de datos faltantes de las series de tiempo, como tampoco se tiene en cuenta la exigencia metodológica de contar con dos estaciones sobre la misma corriente, que corresponden a filtros adicionales que limitan la utilización de la información en la Metodología MADS.

Para clarificar esto se presenta la Tabla 6, en la que se lista una muestra representativa de todas las estaciones limnimétricas y limnigráficas, 39 en total, de zonas con potencial hidroenergético medio-alto y alto. En esta se puede identificar que solo 13 estaciones de las 39 disponibles, es decir, el 33%, presentan un porcentaje de datos faltantes menor que el 10%. Además se identifica que 31 estaciones (79%) presentan una longitud de registro mayor a 10 años. Según esto, si se extrapola este resultado para toda la región con potencial hidroenergético medio-alto y alto, se puede decir que de las 212 estaciones se espera que solo cumplan con el requisito de longitud de período completo unas 70 estaciones, el 29% del total.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 5 Porcentaje de datos faltantes y longitud de registro en las estaciones de caudal suministradas por I-Consult

N°	Nombre	Fecha Inicial	Fecha Final	N° Años	Porcentaje de faltantes
1	Albania	1994	2001	8	15,10%
2	Bocatoma	1985	2009	25	3,60%
3	Butantan	1967	2003	37	34,40%
4	La Dabeida	1976	2005	30	8,20%
5	Puente Carretera	1990	2010	21	4,40%
6	El Añil	1972	2005	34	10,40%
7	El Cangrejo	1979	2005	27	40,20%
8	El Portento	1999	2004	6	27,30%
9	La Herencia	1994	2009	16	49,50%
10	La Tabeida	1972	2003	28	32,90%
11	Las Playas	1995	2004	10	5,40%
12	Montezuma	1980	2009	30	1,90%
13	Mutata	1976	2005	30	31,60%
14	Nemizaque	1971	2005	35	1,90%
15	Pena de los Micos	1972	2009	38	15,40%
16	Pte Anorí	1975	2005	31	6,00%
17	Puente Carretera	1998	2004	7	17,10%
18	Puente Carretera	1995	2004	10	13,70%
19	Puente Carretera	1980	2007	28	15,40%
20	Puente Linda	1969	2002	34	8,40%
21	Puente Marquetalia	1994	2002	9	7,40%
22	Puente Mulas	1987	2007	21	4,20%
23	Rotambria	1980	1990	11	56,80%
24	San Juan	1976	2010	35	46,40%
25	Tascon	1977	1999	23	49,70%
26	Bocatoma	1993	2000	8	69,10%
27	California	1995	2002	8	16,80%
28	El Chuzo	1986	2009	24	19,90%
29	Juntas	1998	2002	5	6,00%
30	La Miel	1978	2003	26	3,20%
31	La Suecia	1998	2004	7	21,40%
32	Los Pomarrosos	1988	2010	23	40%
33	Puente Carretera	1994	2001	8	12,50%
34	Puente La Bolivar	1993	2009	17	10,00%
35	Puente Luisa	1985	2009	25	10,30%

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

N°	Nombre	Fecha Inicial	Fecha Final	N° Años	Porcentaje de faltantes
36	Quibdó	1984	2009	26	25,50%
37	San Vicente	1984	2008	25	11,20%
38	Venaga	1972	2009	38	3,10%
39	Tres y Medio	1974	1990	17	11%

La solución al problema que se expone en la metodología MADS sería la instalación de las estaciones de caudal particularmente para cada proyecto. Los autores de la metodología exponen que esto no sería excesivo y podría ser cumplido en la mayoría de los casos (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008), premisa que se cuestiona para proyectos hidroeléctricos en planeamiento. Esto retrasaría el desarrollo de nuevos proyectos por lo menos 10 años, que es el tiempo de registro mínimo requerido, argumentado sobre la premisa que las etapas tempranas de desarrollo hasta la fase de diseños detallados tienen una duración cercana a los 10 años, cuando en realidad no debería superar los tres años.

○ **Homogeneidad y Consistencia**

En la Tabla 6 se presenta un resumen con los resultados de la ejecución de las pruebas de homogeneidad (cambios en la media de Pettitt) y consistencia (tendencia de Mann-Kendall), que se detallan en el ANEXO 1, donde el valor p-bilateral debe ser mayor que el nivel de significancia para no rechazar las respectivas hipótesis (los datos son homogéneos y los datos no presentan tendencia). En la tabla se puede observar que de las 39 estaciones de caudal analizadas (una muestra estadísticamente significativa del total de las 231 estaciones de caudal de las zonas de interés), ubicadas en corrientes con potencial hidroenergético, solo cuatro cumplen los requerimientos sobre homogeneidad, consistencia y longitud de registro completo, es decir el 10%.

Tabla 6 Resultados de la aptitud de las series temporales para su utilización en la metodología MADS

N°	Nombre	Código	N° Años	Homogeneidad	Consistencia	Longitud de series con registros completos ¹
1	Albania	2618718	8	No	No	No
2	Bocatoma	21217250	25	No	No	No
3	Butantan	2305708	37	No	Si	Si
4	La Dabeida	1111705	30	No	Si	Si
5	Puente Carretera	15027010	21	No	Si	Si
6	El Añil	1111701	34	No	Si	Si
7	El Cangrejo	2621704	27	No	No	No
8	El Portento	4-157-1	6	No	No	No
9	La Herencia	26187170	16	No	No	No
10	La Tabeida	4-155	28	Si	Si	No
11	Las Playas	2302705	10	No	Si	Si
12	Montezuma	21217180	30	Si	No	No
13	Mutata	1111704	30	No	No	No
14	Nemizaque	2402703	35	No	No	Si
15	Pena de los Micos	37027010	38	No	No	Si
16	Puente Anorí	2702709	31	Si	Si	Si
17	Puente Carretera	4-916	7	No	No	No
18	Puente Carretera	4-919	10	No	No	No
19	Puente Carretera	2302706	28	Si	Si	No
20	Puente Linda	2305709	34	No	No	Si
21	Puente Marquetalia	2305712	9	No	No	No
22	Puente Mulas	2110702	21	No	No	Si
23	Rotambria	37037020	11	No	No	No
24	San Juan	2703703	35	No	No	No
25	Tascon	1111703	23	No	No	No
26	Bocatoma	21217230	8	No	No	No
27	California	21217210	8	No	No	No

¹ Debe tener un período de 10 años con máximo el 10% de datos faltantes

N°	Nombre	Código	N° Años	Homogeneidad	Consistencia	Longitud de series con registros completos ¹
28	El Chuzo	21217270	24	Si	Si	Si
29	Juntas	21217190	5	No	No	No
30	La Miel	2305711	26	Si	Si	Si
31	La Suecia	2302703	7	No	No	No
32	Los Pomarrosos	16027010	23	No	No	No
33	Puente Carretera	4-159	8	Si	Si	No
34	Puente La Bolivar	21217280	17	No	No	No
35	Puente Luisa	21217140	25	Si	No	Si
36	Quibdó	1104701	26	Si	Si	No
37	San Vicente	21217220	25	No	Si	Si
38	Venaga	37017050	38	Si	Si	Si
39	Tres y Medio	27027070	17	Si	Si	No

Estos resultados confirman que la falta de calidad y cobertura en la información hidrometeorológica colombiana es frecuente y en términos generales deja mucho que desear (Pérez, Poveda, Mesa, Carvajal, & Ochoa, 1998). Esto es, considerando el desarrollo de proyectos en ríos de montaña, con suerte se contaría con alguna estación de medición de caudales, la cual posiblemente tenga menos de 10 años de registro, o por el contrario tenga una mayor longitud, pero es realmente difícil que se encuentren períodos completos, homogéneos y libres de tendencia.

Acerca de que en la formulación de los criterios de la metodología MADS se considera necesario que la información hidrométrica sea libre de tendencia, se comenta que ésta puede ser causada por diferentes factores, que pueden ser principalmente errores de calibración de la estación o simplemente que los datos naturales la presenten, respondiendo a cambios en el medio circundante. Esto último es el caso actual: el cambio climático ha causado tendencia en los fenómenos físicos que inciden en los caudales de los ríos en Colombia, tanto en los caudales máximos, como en los medios y los mínimos (Cantor Gómez & Ochoa Jaramillo, 2011) (Poveda, 2010), (Rave, Poveda, & Mantilla, 2001). Por lo tanto, es evidente la dificultad en el cumplimiento del criterio cuando va en contravía al comportamiento de los fenómenos físicos que inciden en los datos.

Así mismo, es necesario comentar que es difícil diferenciar un cambio en la media dado por cambios en la calibración de la estación, errores de medición, cambio en los equipos o cambios climáticos. Por esto, se recomienda tener en cuenta una serie de referencia representativa de una variable asociada a la serie a probar (p.e. caudal-precipitación). (López Díaz, 2004)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

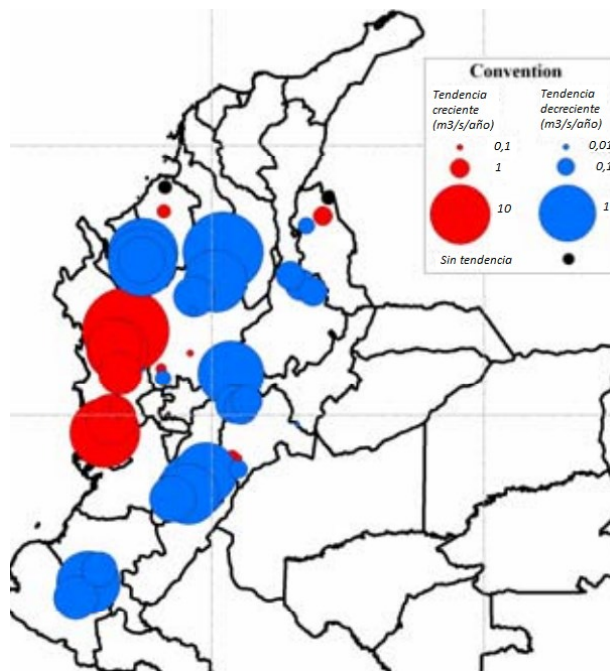
Además de esto, en la Metodología MADS se describe un procedimiento que parece erróneo. Esto es, las funciones de probabilidad en los datos diarios de variables hidrológicas presentan colas largas en los mínimos y los máximos, por lo que los análisis de homogeneidad y consistencia resultan inadecuados, hecho que es motivo de investigación actual. Una práctica más adecuada es la agregación de períodos más largos (meses, años, N° de días por encima de umbrales) derivados de los datos diarios (López Díaz, 2004).

En el país existe tendencia en los diferentes componentes del clima (Poveda, 2010), por lo que es de esperar que exista tendencia en los caudales de un río. Esto es, el cambio climático incide en las temperaturas de la tierra, provocando que aumenten las tasas de evaporación de los cuerpos de agua, cambien de magnitud o dirección las corrientes oceánicas y de vientos, aumenten la frecuencia y la severidad de los fenómenos macroclimáticos, entre otros. Esto da como resultado general una alteración de las variables incidentes sobre el caudal, como lo son principalmente la precipitación y evapotranspiración.

Son varios los estudios que evidencien tendencias de largo plazo y cambios en la media y la varianza de diferentes series hidrológicas en Colombia (Mesa, Poveda & Carvajal., 1997 citado por (Rave, Poveda, & Mantilla, 2001). Los resultados de tal estudio muestran cambios estadísticamente significativos en dichas series, como aumentos en las temperaturas mínimas y medias, aumentos en la humedad atmosférica y en la evaporación potencial. Las lluvias no presentan señales claras de cambio climático, pero los caudales muestran tendencias decrecientes en las principales cuencas colombianas. Estos resultados son consistentes dentro de un escenario de calentamiento global, incluyendo diferencias importantes dentro del año, de las temporadas de altas y bajas lluvias en Colombia (Pérez et al., 1998 citado por (Rave, Poveda, & Mantilla, 2001). Una mezcla de aumento y disminución de las tendencias a largo plazo también se encontraron en los registros mensuales de precipitación en toda Colombia (Pérez, Poveda, Mesa, Carvajal, & Ochoa, 1998), (Rave, Poveda, & Mantilla, 2001).

Por otra parte, de Carmona y Poveda (2008) se concluye que la mayoría de las series de caudales promedios mensuales de los ríos de Colombia exhibe tendencias decrecientes. Tal disminución en los caudales promedios mensuales es casi generalizada en todo el país, confirmada en estudios más recientes, en particular, en las cuencas de los Ríos Magdalena y Cauca, tal como se muestra en la Figura 10. Esta figura muestra la distribución espacial exhibiendo incrementos (rojo) y decrecimientos (azul); el diámetro de los círculos indica la correlación de la magnitud de la tendencia (Carmona & Poveda, 2011).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Fuente: (Carmona & Poveda, 2011)

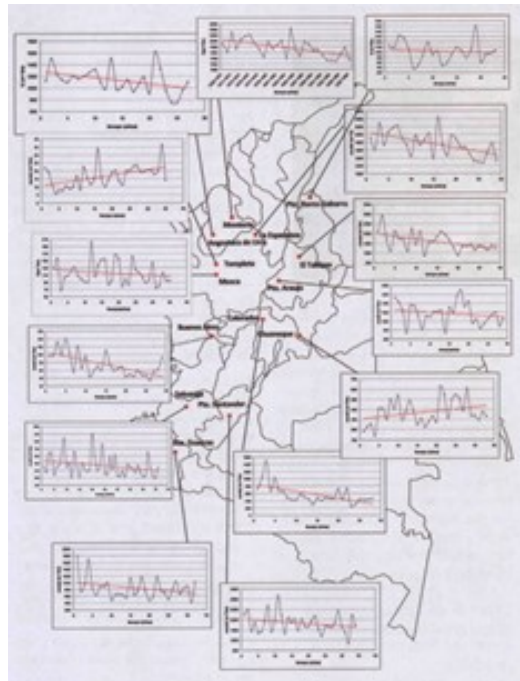
Figura 10 Resultados de análisis de tendencias mensuales en los ríos

Las tendencias más crecientes en los caudales medios mensuales son presenciadas en las estaciones ubicadas en las regiones bajas de la costa del Pacífico, mientras que las tendencias decrecientes en gran parte de la región andina de Colombia (Carmona & Poveda, 2011).

Además, las tendencias decrecientes significativas se han identificado en las descargas fluviales promedio mensuales en las cuencas de los ríos más importantes del país, a saber, las de los ríos Magdalena y Cauca, que cruzan el país en dirección Sur-Norte y salida hacia el Mar Caribe.

Hay tendencias también en las series de caudales máximos anuales. La Figura 11 muestra las tendencias en series de caudales máximos anuales en Colombia. Tales tendencias temporales en la media de los caudales máximos anuales evidencian el colapso de la hipótesis estacionariedad, es decir que la estacionariedad es una hipótesis inválida de trabajo para los diseños hidrológicos en ingeniería. Algunas series de la figura siguiente muestran tendencias crecientes, otras muestran tendencias decrecientes. Todas son resultado de la acción combinada del cambio climático antropogénico, de la variabilidad climática natural, así como de la deforestación (Figura 11).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Fuente: Poveda & Álvarez, 2010

Figura 11 Serie de caudales máximos anuales en diversos ríos de Colombia

En el caso de las series de interés en este trabajo, mostradas en la Tabla 1, se ha hecho un análisis de tendencias de caudales medios asociados con diferentes niveles de probabilidad de excedencia, evaluando los caudales mínimos (90% y 95%), los caudales medios (50%) y los caudales máximos (5%, 10%). A continuación se presenta una gráfica de una de esas estaciones de interés. Las demás se presentan en el ANEXO 2.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

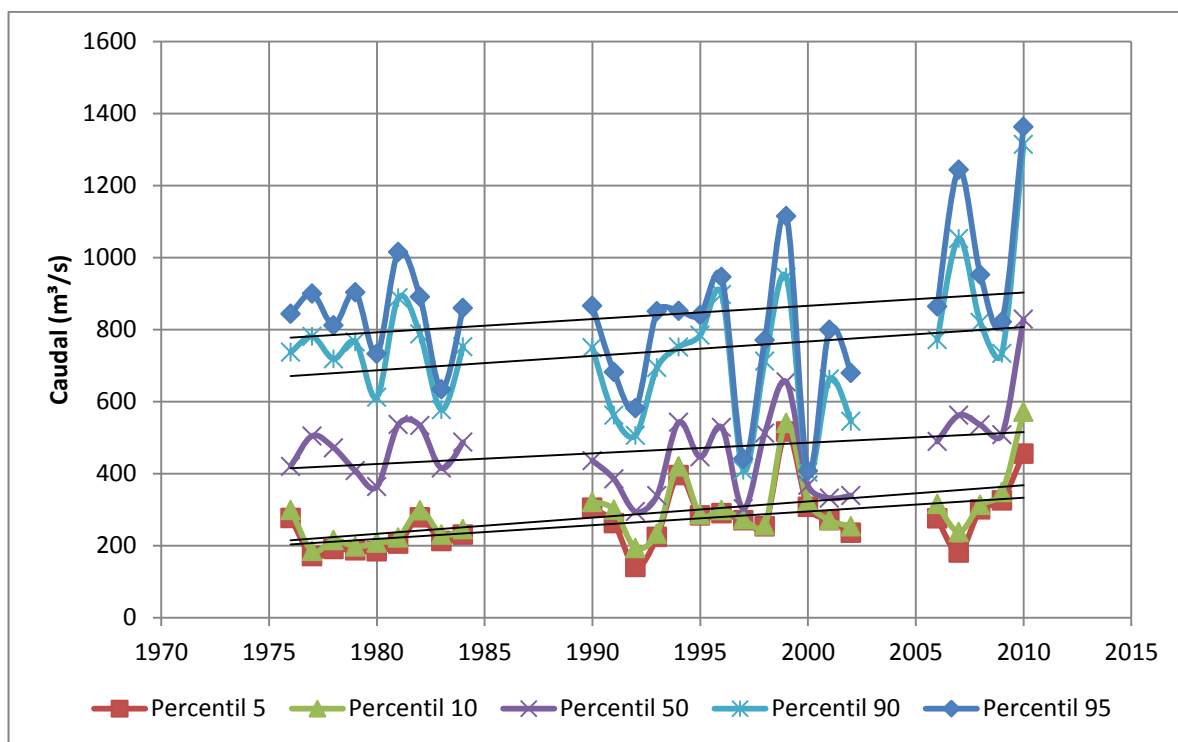


Figura 12 Evaluación de tendencias de largo plazo en los registros de caudal de la estación San Juan

Un resumen de los resultados de tendencias asociadas a diferentes niveles de probabilidad de excedencia se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7 Resumen de los resultados de tendencias de 39 estaciones limnimétricas y limnigráficas

Estación	Percentil 5	Percentil 10	Percentil 50	Percentil 90	Percentil 95
Albania	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente
Bocatoma Cay	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente
Butantan	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente
Dabeiba	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Creciente	Creciente
Don Diego	Decreciente	Decreciente	Creciente	Creciente	Creciente
El Añil	Creciente	Creciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
El Cangrejo	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
El Portento	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente	Decreciente

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Estación	Percentil 5	Percentil 10	Percentil 50	Percentil 90	Percentil 95
La Herencia	Creciente	Creciente	Creciente	Decreciente	Creciente
La Tebaida	Creciente	Creciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
Las Playas	Decreciente	Decreciente	Creciente	Creciente	Creciente
Montezuma	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
Mutatá	Creciente	Creciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
Nemizaque	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
Pena de los Micos	Decreciente	Neutro	Creciente	Creciente	Creciente
Puente Carretera (4-916)	Decreciente	Decreciente	Creciente	Creciente	Creciente
Puente Carretera (4-919)	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
Puente Carretera (2302706)	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente
Puente Anorí	Creciente	Creciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
Puente Linda	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente
Puente Marquetalia	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
Puente Mulas	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
Rotambria	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente
San Juan	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente
Tascón	Creciente	Creciente	Creciente	Decreciente	Decreciente
California	Creciente	Neutro	Neutro	Neutro	Neutro
El Chuzo	Decreciente	Decreciente	Neutro	Decreciente	Decreciente
Juntas	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
La Miel	Creciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
Puente La Bolívar	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
La Suecia	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Decreciente
Quibdó	Neutro	Neutro	Neutro	Neutro	Neutro
San Vicente	Neutro	Decreciente	Creciente	Creciente	Creciente
Venaga	Creciente	Creciente	Neutro	Creciente	Creciente
Puente Luisa	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente	Creciente
Puente Carretera	Decreciente	Decreciente	Decreciente	Creciente	Creciente

Como se puede concluir de la tabla anterior, salvo Quibdó (que evidentemente presenta problemas en la medición, todas las series analizadas presentan una tendencia creciente o decreciente, lo que indica que es estrictamente necesario incluir esta variable en la estimación del caudal ambiental para proyectos hidroeléctricos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- **Índices hidrológicos y alteración máxima de la curva de duración de caudales**

Como se expone en el numeral 1.3.1, los índices 7Q10 y Q95 han sido desarrollados regionalmente, buscando objetivos y necesidades específicas de las zonas. Es posible argumentar que su obtención y justificación general obedece a comportamientos hidrológicos y biológicos disímiles a las condiciones colombianas por lo que carecen de validez en este contexto.

De igual manera, no es posible generalizar la validez de los umbrales de alteración de la curva de duración de caudales. En principio no se encuentra ninguna explicación para que la relación de los percentiles deba exceder 0,50 para las condiciones con y sin proyecto. Los requerimientos metodológicos similares han sido desarrollados, análogamente a los índices hidrológicos, para condiciones regionales particulares y proyectos con objetivos de regulación de caudales, de tal modo que han sido adaptados para su utilización en regiones y condiciones diferentes a la colombiana. Por esto se considera imprudente generalizar estos umbrales, al parecer arbitrarios, para la zona Andina colombiana, y más particularmente, para todo tipo de proyectos.

Es así como los principales índices hidrológicos involucrados en los caudales ambientales, surgen de una correlación del comportamiento de las variables físicas que afectan el hábitat natural de los ríos con el comportamiento hidrológico de la corriente, para encontrar así un umbral a partir del cual, los objetivos de conservación son gravemente degradados. Esto es de carácter regional y buscan objetivos específicos que no necesariamente son de interés para las corrientes colombianas (p.e. garantizar la migración de salmónidos), situación que explica la existencia de más de 200 metodologías hidrológicas alrededor del globo. Además de esto, las variables analizadas hacen parte de un sistema dinámico de comportamiento complejo y adaptable, que dependen intrínsecamente de las condiciones hidroclimáticas, geomorfológicas, geográficas, etc, propias de las regiones en estudio, por lo que se considera inadecuada la utilización de cualquier índice que no sea desarrollado en el contexto colombiano.

Por esto, es necesario que se adelanten investigaciones regionales exhaustivas acerca de los requerimientos del hábitat para los ríos colombianos, teniendo en cuenta las particularidades de cada región. Es fundamental que para cada zona del país se establezcan los objetivos de preservación, ya sea con especies objetivas, estudios de macroinvertebrados o análisis ecosistémicos integrales y se correlacionen los posibles resultados con la hidrología. Así se podría obtener una mejor aproximación hidrológica para la estimación de caudales ambientales. Sin embargo, lo anterior supone demanda exhaustiva en tiempo y recursos (la obtención de los índices de la metodología de Tennant llevó un poco más de 10 años) y quedaría como un compromiso de las autoridades colombianas, así como lo han hecho en el resto del mundo (p.e la US Fish and Wildlife Service es la encargada de establecer estos índices en gran parte de los EEUU).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Mientras tanto, el desarrollo de proyectos de extracción, principalmente hidroeléctricos, constituyen un factor clave en el desarrollo sostenible de Colombia. Estos plantean el aprovechamiento de un recurso renovable para proveer un servicio público, e incluso se ha convertido en un gran clúster de negocios, reconociendo el alto potencial del país. En relación a esto, las entidades encargadas del licenciamiento no pueden esperar a que se completen las investigaciones necesarias sobre los requerimientos del hábitat de los ríos y por consiguiente, deben tomar decisiones al respecto (García de Jalón & González del Tánago, 2004).

Entonces, la propuesta de mejora de la metodología en los términos de los índices hidrológicos consiste en la consideración de la forma de la curva de duración de caudales.

En general, los caudales mínimos, medios y máximos obedecen a comportamientos diferentes de las variables físicas que los provocan, ocasionando diversas distribuciones de probabilidad. Los caudales máximos obedecen a grandes tormentas distribuidas en la cuenca; los caudales mínimos, por el contrario, obedecen al flujo base que ha sido almacenado en el suelo y la roca y se vuelve superficial debido a la disminución en los niveles freáticos durante el verano; y por último los caudales medios obedecen a la dinámica normal de la escorrentía superficial y subterránea dadas por la precipitación en la cuenca. Es decir, cada uno de estos conjuntos de datos es una familia de datos diferente, que se hace evidente con un análisis visual de la misma curva de duración de caudales.

Para ilustrar lo anterior, en la Figura 13 se presenta la curva de duración de caudales de la estación limnigráfica Puente Carretera, ubicada sobre el río Guarinó en el departamento de Caldas.

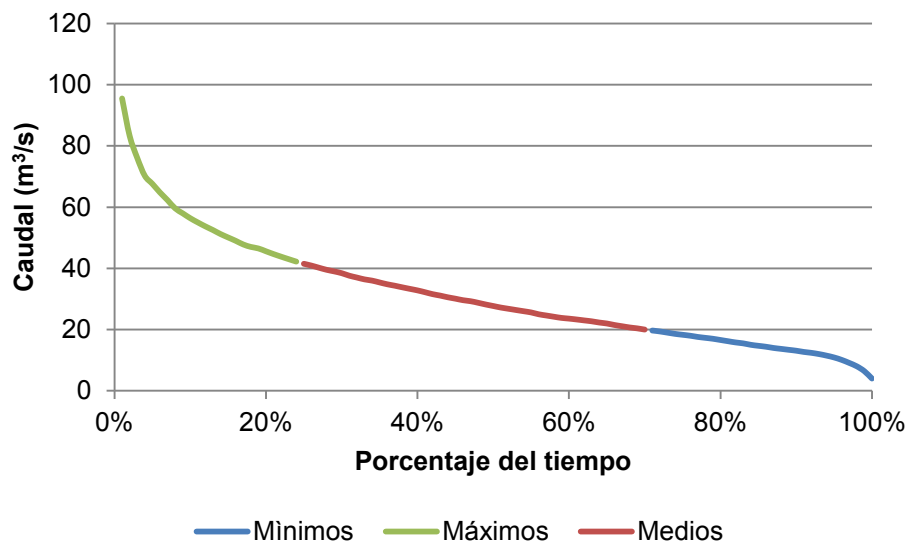


Figura 13 Curva de duración de caudales de la estación Puente Carretera ubicada sobre el río Guarinó

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Así mismo, para evidenciar este comportamiento en diferentes ríos colombianos, se realizó el análisis para las estaciones suministradas por I-Consult (Tabla 1), ejercicio que se presenta en el ANEXO 3. En la Tabla 8 se presenta el resumen de la identificación de los umbrales de los caudales mínimos obtenidos precisamente de las curvas de duración de caudales de las series registradas por dichas estaciones.

Tabla 8 Resumen de la identificación del umbral de los caudales mínimos de 39 estaciones limnimétricas y limnigráficas

Nombre	Código	Probabilidad de excedencia	Caudal m³/s
Albania	2618718	0,93	4,15
Ante Soloy	Panamá	0,97	0,66
Bocatoma Cay	21217250	0,97	0,34
Butantan	23005708	0,98	30
Dabeiba2	1111705	0,99	22
Don Diego	15027010	1	1,8
El Añil	1111701	0,99	7,43
El Cangrejo	2621704	0,99	0,99
El Portento	4-157-1	0,99	10,15
La Herencia	26187170	0,98	4,6
La Tabeida	4-155	0,97	8
Las Playas	21217180	0,99	6,47
Montezuma	21217180	0,97	1,1
Muntata	1111704	0,85	169,3
Nemizaque	2402703	0,99	0
Pena de los Micos	37027010	0,99	1,08
Puente de Anorí	2702709	0,99	15,5
Puente Carretera	4-916	0,96	2,15
Puente Carretera	4-191	0,88	2,61
Puente Carretera	2302706	1	4
Puente Linda	2305709	0,97	15
Puente Marquetalia	2305712	0,9	2,1
Puente Mulas	2110702	0,96	5,84
Rotambria	37037020	0,99	2,7
San Juan	2703703	0,99	164,1

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Nombre	Código	Probabilidad de excedencia	Caudal m³/s
Tascon	1111703	0,96	61
Bocatoma La Plata	21217230	0,99	0,58
California	21217210	0,94	0,034
El Chuzo	21217270	0,99	1,72
Juntas	21217190	0,65	0,942
Venaga	37017050	1	4,682
San Vicente	21217220	0,96	1,76
Quibdó	1104701	0,77	603
La Bolivia	21217280	0,92	1,29
Puente Carretera	4-159	0,95	3,04
La Suecia	2302703	0,97	3,47
La Miel	2305711	0,98	0,9

Ahora bien, si se asume que los caudales ambientales deben obedecer al comportamiento de los caudales mínimos históricos, se propone como Valor de Referencia Hidrológico el caudal que representa el umbral a partir del cual se pueden caracterizar los caudales mínimos, es decir, el caudal máximo de los mínimos. Este, para las estaciones analizadas, está más cerca de ser el Q98, es decir el caudal de ser excedido el 98% del tiempo, que de otro valor índice, tal como se demuestra en la figura siguiente. Entonces el índice hidrológico podría expresarse como un porcentaje de descuento sobre este valor de referencia y así se incluiría la forma de la curva de duración de caudales en la estimación del caudal ambiental.

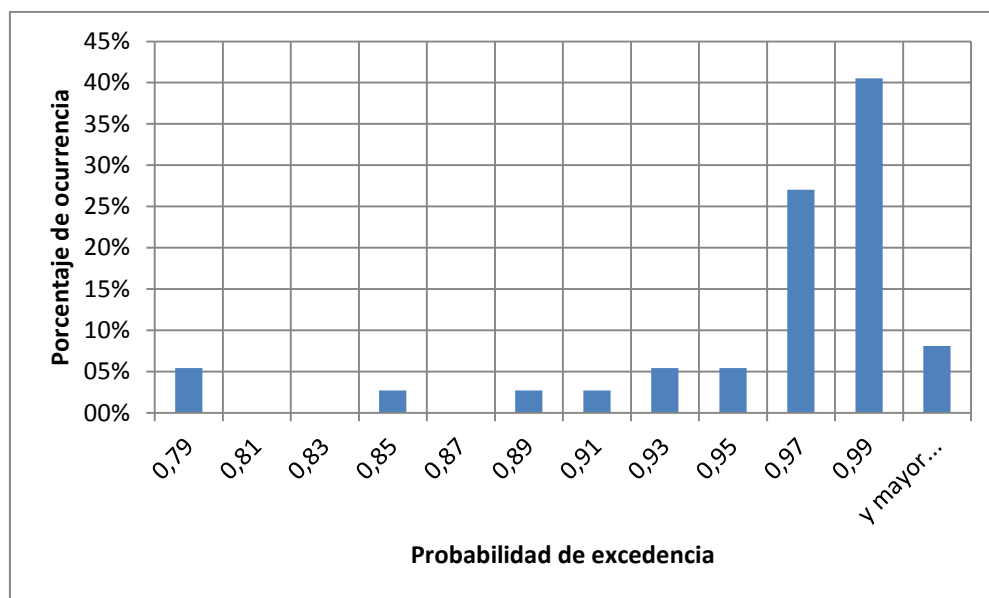


Figura 14 Histograma de frecuencia del umbral de los caudales mínimos de 39 estaciones limnimétricas y limnigráficas

3.2 ESTIMACIÓN DE LOS CAUDALES AMBIENTALES

En este numeral se presentan los resultados de la estimación de caudales ambientales para los proyectos Mayaba y Santo Domingo con la metodología MADS. Estos comprenden los criterios específicos de la zona de estudio, no como parte de la estimación, pero sí como una actividad importante en la evaluación de los posibles impactos generados por la extracción del caudal de las corrientes. Luego se presentan los cinco pasos correspondientes al criterio hidrológico de la metodología MADS que conciernen a la recopilación de información, el análisis de homogeneidad y consistencia, la correlación con índices macroclimáticos, la clasificación de registros por condición hidrológica y finalmente la estimación de los índices hidrológicos propuestos por los autores de la metodología MADS.

3.2.1 Paso 1: Recopilación de información

- **Proyecto Hidroeléctrico Mayaba**

En la Figura 11 se presenta el registro de la estación San Juan, ubicada sobre el río Nechí, dos kilómetros aguas-abajo de la confluencia con el río Porce. La longitud de la serie es de 13072 días (36 años), de los cuales se cuenta con 6849 (18 años) registros para un total de 6223 (16 años) datos faltantes, es decir el 45%. Esta información no resulta ser válida a la luz de la metodología, pues no presenta ningún período de 10 años

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

con menos del 10% de datos faltantes, sin embargo, se considera la información más valiosa para la formulación y evaluación del proyecto, pues constituye la única información primaria existente aguas-abajo de la confluencia del Porce en el Nechí.

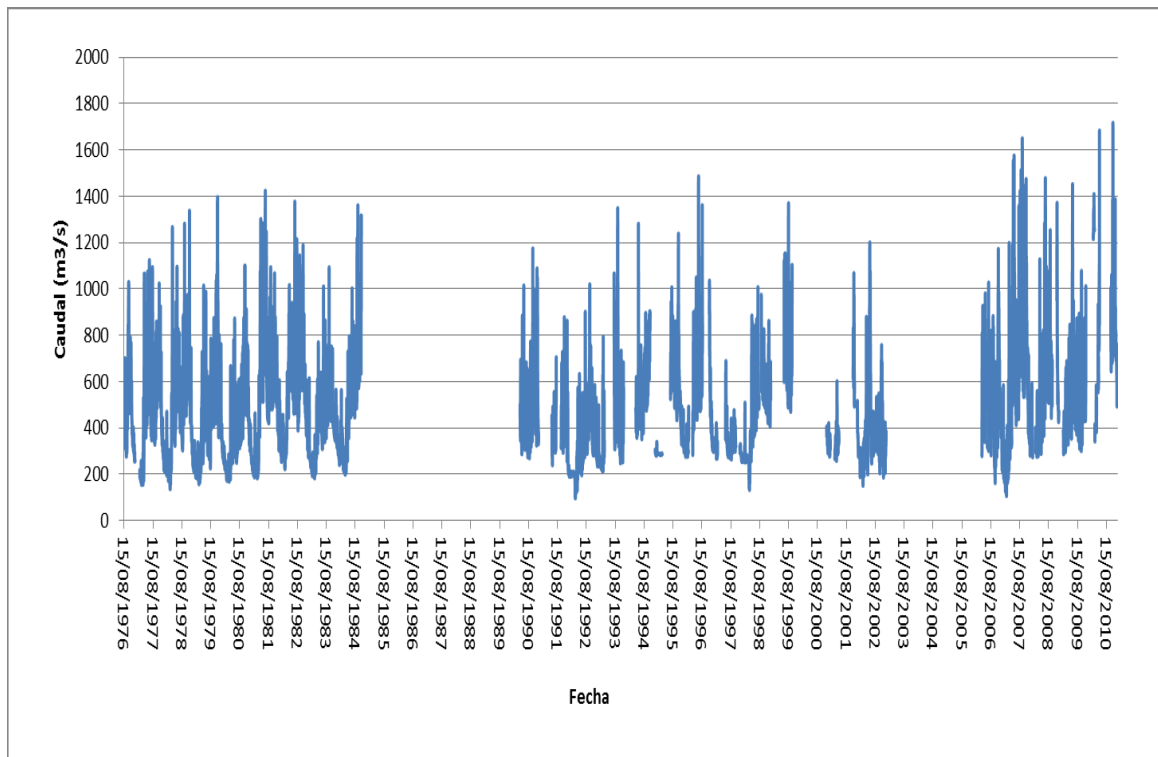


Figura 15 Serie de caudales de la estación San Juan

En la Figura 12 se presenta el registro de la estación Tres y Medio, ubicada sobre el río Nechí, cinco kilómetros aguas-arriba de su confluencia con el río Porce. El registro presenta un total de 3082 registros (8,44 años) en 3457 periodos (9,46 años) para un total de 375 datos faltantes (11%). Como se puede observar, esta estación no cumple con el criterio de período mínimo de registros con el máximo porcentaje de datos faltantes. Sin embargo, se considera valiosa la información porque puede utilizarse para completar el registro de la estación San Juan. Se reconoce que este procedimiento puede inducir algún tipo de error en los resultados, pues esta estación solo describe los caudales del río Nechí sin la influencia del río Porce.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

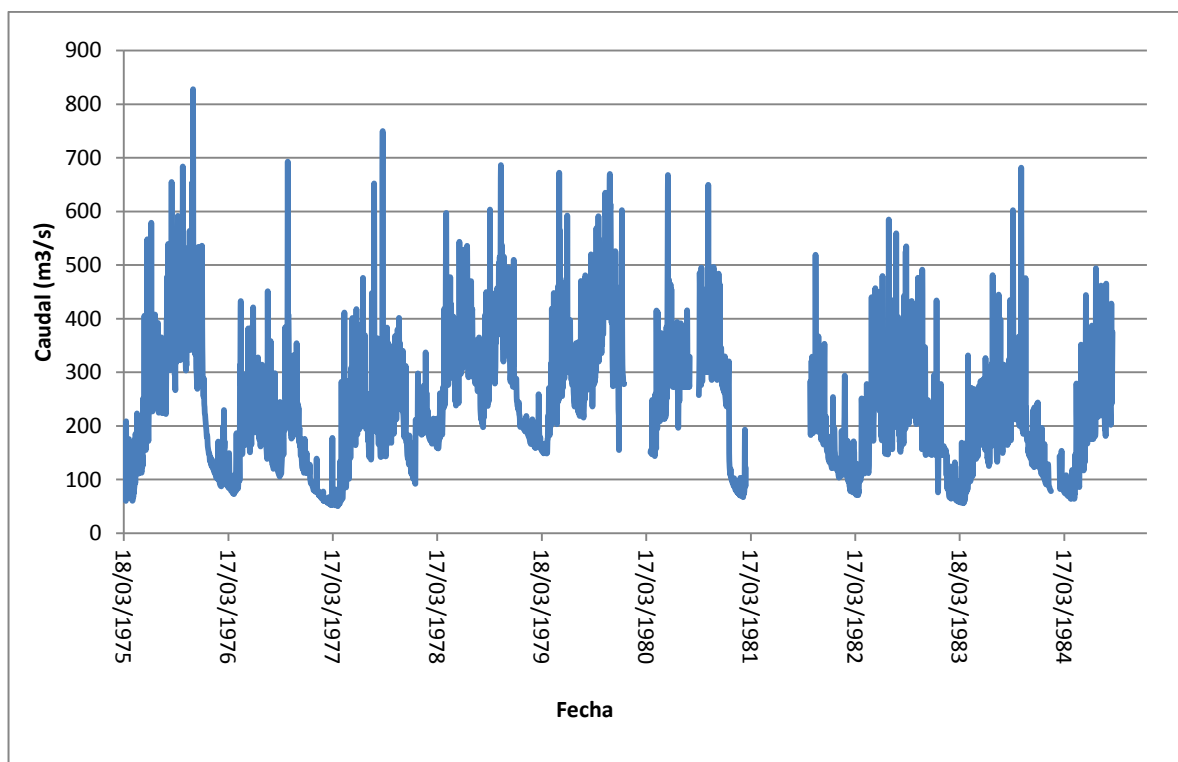


Figura 16 Serie de caudales de la estación Tres y Medio

Se realizó una regresión por mínimos cuadrados de la serie de la estación San Juan en la ordenada, con la estación Tres y Medio en la abscisa (Figura 13). En esta se evidencia que el caudal en la estación Tres y Medio representa el 56% de la variabilidad natural del caudal en la estación San Juan. El hecho que este valor sea menor al 100% (o en su defecto un valor cercano) sugiere que si se utiliza la regresión para pronosticar el caudal de la estación San Juan se inducirá error, dado por el desconocimiento de la serie del río Porce. Sin embargo, no se puede desconocer que la relación existente no es ocasionada por el azar, porque el valor del estadístico F es significativamente mayor al valor crítico de la distribución. Se considera, a pesar del error inducido, que es más conveniente utilizar la información para rellenar los datos perdidos de la estación San Juan, con el fin de contar con un insumo de mayor continuidad para las estimaciones de los índices hidrológicos. Este procedimiento permite agregarle 575 registros a la serie de caudales para el proyecto.

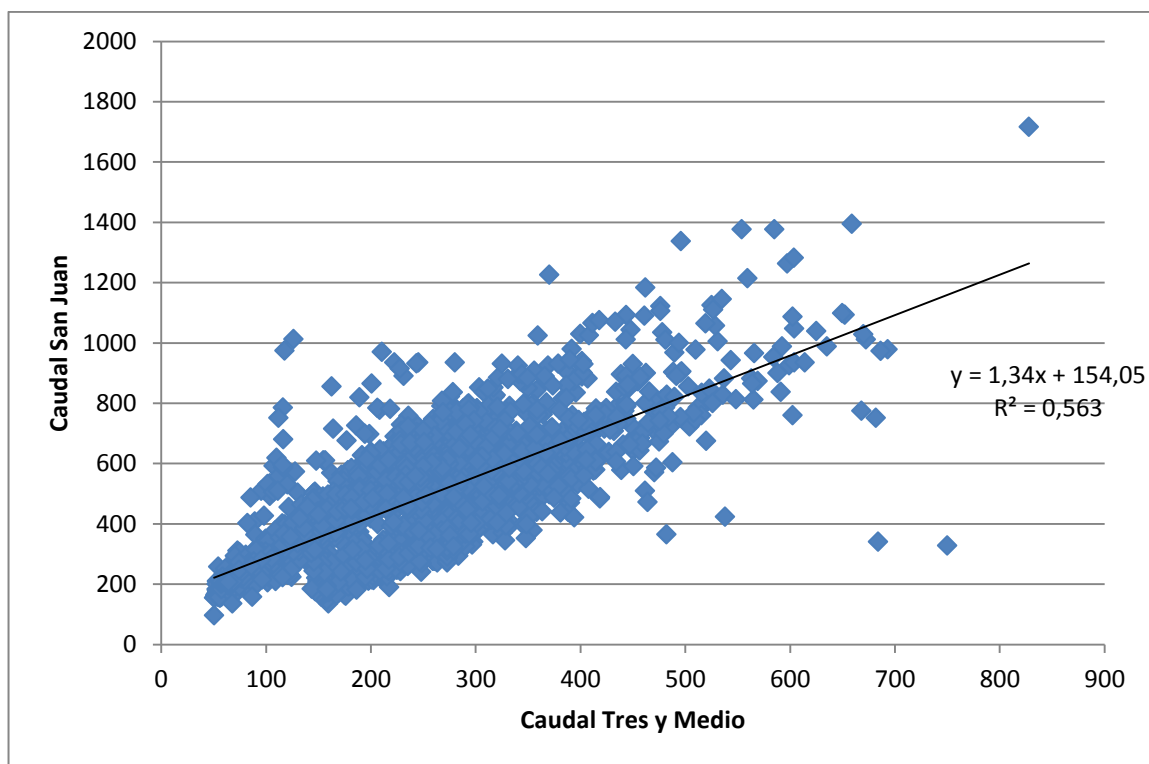


Figura 17 Regresión por mínimos cuadrados de los datos de la estación San Juan vs los datos de la estación Tres y Medio.

En la Figura 18 se presenta la serie de caudales de la estación San Juan rellena con los resultados de la regresión por mínimos cuadrados de la estación Tres y Medio. Esta actividad permitió agregarle 575 datos a la serie, con los que se logra un período de 9,62 años sin datos faltantes, que se acerca más a los requerimientos de la metodología MADS. Esta serie es la que finalmente se utiliza para calcular los índices hidrológicos del Paso 5 de dicha metodología.

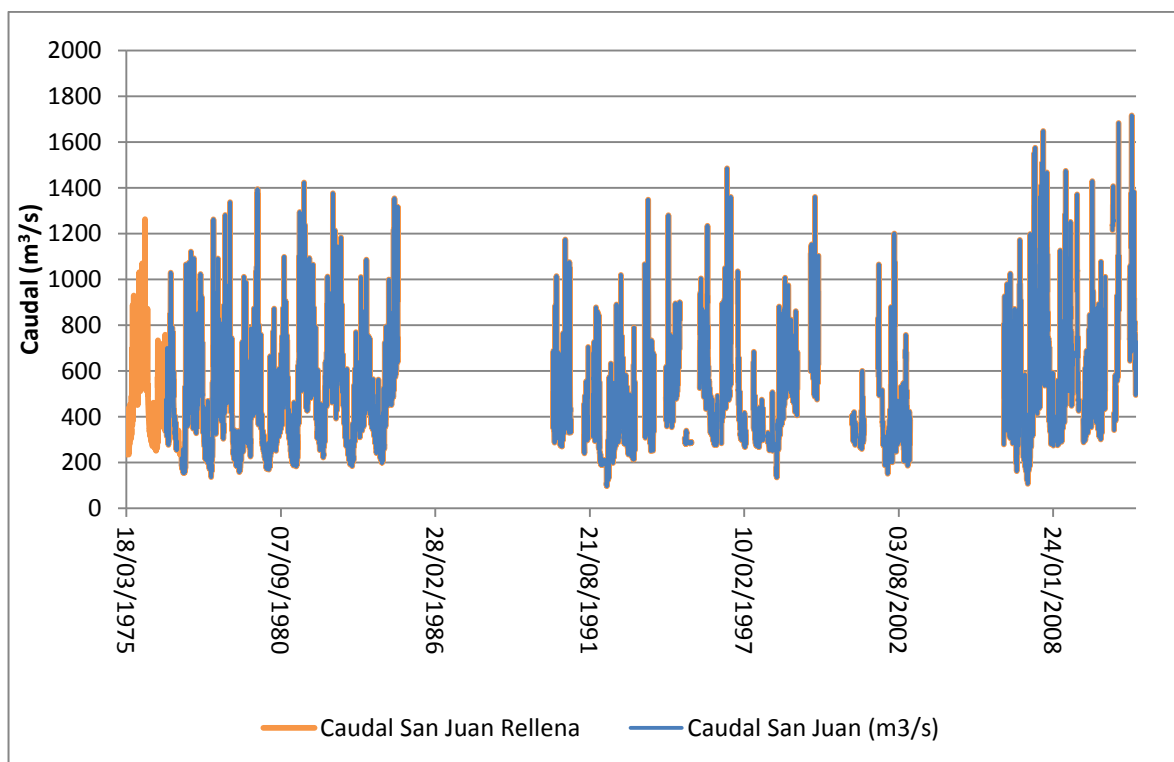


Figura 18 Serie de caudales de la estación San Juan rellena con los datos de la estación Tres y Medio

○ **Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo**

En la Figura 19 se presentan los caudales medios diarios en el sitio de captación del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo, obtenidos por el método de transposición de caudales, a partir del registro de la estación Puente Carretera, ubicada sobre el río Guarinó. La longitud de la serie es de 7.671 días (21 años), de los cuales se cuenta con 7303 (20 años) registros para un total de 368 (1 año) de datos faltantes, es decir el 5%. Esta información resulta ser válida a la luz de la metodología, pues cumple el requerimiento sobre períodos de 10 años con menos del 10% de datos faltantes.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

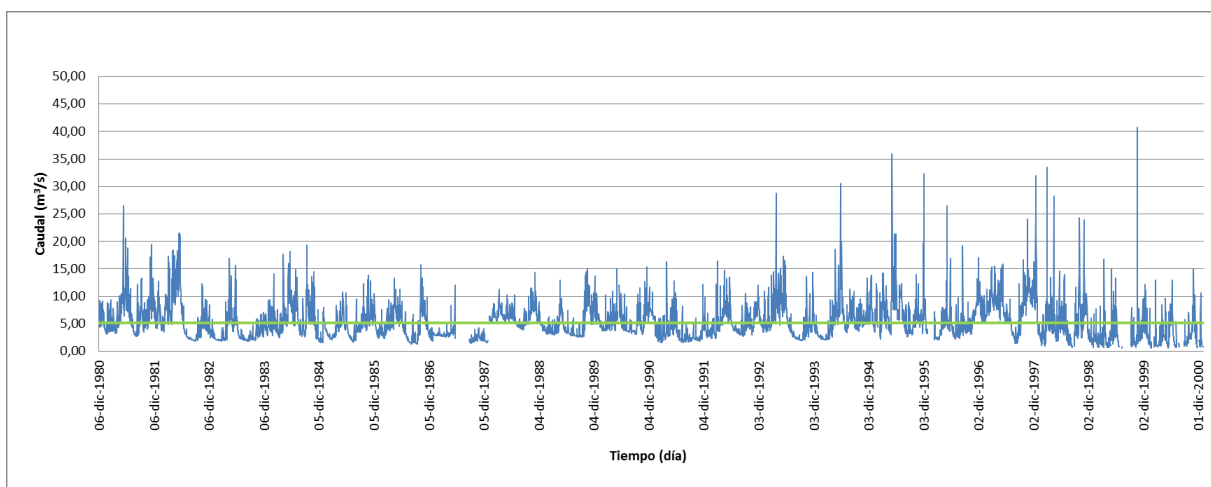


Figura 19 Serie de caudales medios diarios en el sitio de captación del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo obtenida a partir de la transposición de caudales del río Guarínó

En la Figura 20 se presentan los caudales medios diarios de la estación Puente Carretera ubicada sobre el río Santo Domingo. La longitud de la serie es de 3653 días (10 años), de los cuales se cuenta con 3154 (8,6 años) registros para un total de 499 (1,4 año) datos faltantes, es decir el 14%. Esta información resulta ser inválida a la luz de la metodología, pues no cumple el requerimiento sobre períodos de 10 años con menos del 10% de datos faltantes. Además de esto, presenta evidente falta de homogeneidad, consistencia y calidad, por lo que se descarta para su utilización en la metodología MADS.

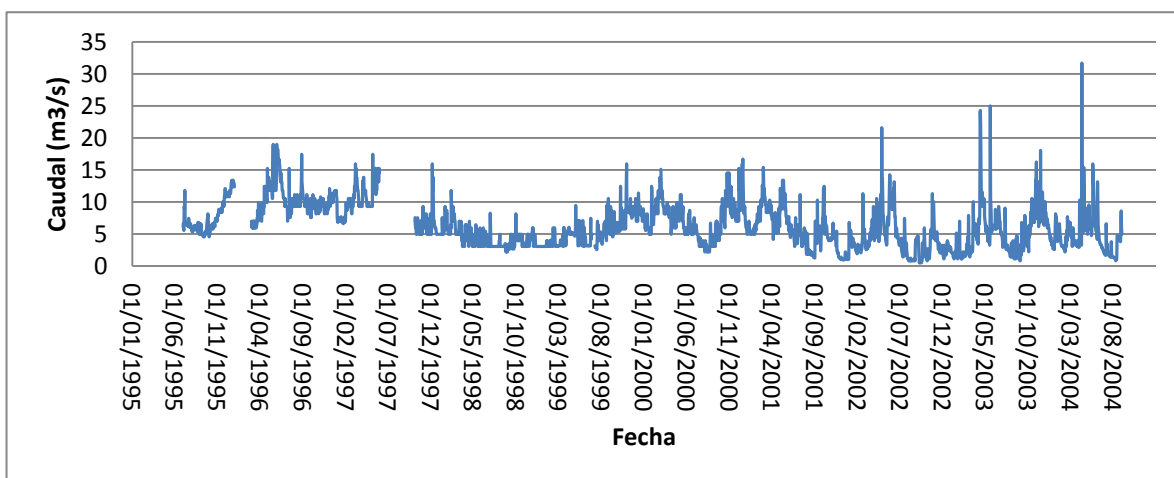


Figura 20 Serie de caudales medios diarios de la estación Puente Carretera ubicada sobre el río Santo Domingo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.2 Paso 2: Análisis de calidad, homogeneidad y consistencia

- **Proyecto Hidroeléctrico Mayaba**

Con respecto a la consistencia, se realizó la prueba de tendencia de Mann-Kendall con un nivel de significancia del 10% para los promedios mensuales de los registros de las estaciones consideradas. En la estación San Juan, el valor del estadístico Z_{MK} resulta ser menor que el valor crítico (Distribución Normal Estándar) para el nivel de significancia dado; por lo que se concluye que se debe rechazar la hipótesis de que los datos no presentan tendencia (se encontró una pendiente de Sen de 0,45). En cambio, la prueba para los datos de la estación Tres y Medio se encontró que el estadístico de prueba es menor al valor crítico para el nivel de significancia dado, por ende, no se puede rechazar la hipótesis de que los datos son consistentes.

Análogamente, para hallar la homogeneidad, a partir de los promedios mensuales de los registros de las dos series, se realizó la prueba de cambios en la media de Pettitt con un nivel de significancia del 10%. En las dos estaciones, el valor del estadístico X_k resulta ser menor que el valor crítico (Distribución Normal Estándar) para el nivel de significancia dado, por lo que se concluye que se debe rechazar la hipótesis de que los datos son homogéneos y se debe asumir que hay una fecha en que cambia la media de la serie, como lo ilustra la Figura 16.

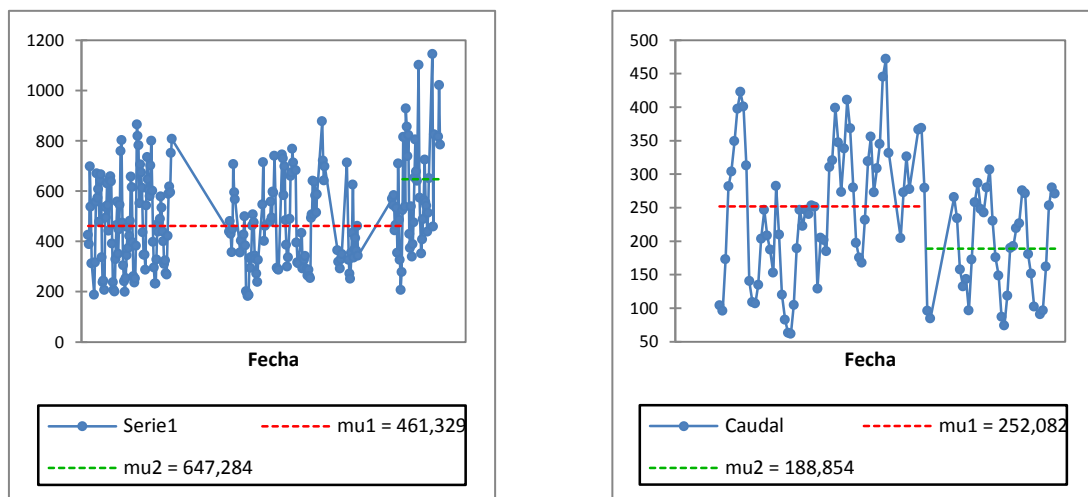


Figura 21 Resultados de la prueba de homogeneidad para las estaciones San Juan (izquierda) y Tres y Medio (derecha)

- **Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo**

Con respecto a la consistencia, se realizó la prueba de tendencia de Mann-Kendall con un nivel de significancia del 10% para los promedios mensuales de los registros considerados (por transposición de caudales). El resultado indica que el valor del estadístico Z_{MK} resulta ser menor que el valor crítico (Distribución Normal Estándar) para el nivel de significancia dado; por lo que se concluye que no se debe rechazar la hipótesis de que los datos no presentan tendencia, es decir, la serie es consistente.

Análogamente, para hallar la homogeneidad, a partir de los promedios mensuales de los registros de la serie, se realizó la prueba de cambios en la media de Pettitt con un nivel de significancia del 10%. El resultado arroja un valor del estadístico X_K resulta ser menor que el valor crítico (Distribución Normal Estándar) para el nivel de significancia dado, por lo que se concluye que se debe rechazar la hipótesis de que los datos son homogéneos y se debe asumir que hay una fecha en que cambia la media de la serie, como lo ilustra la Figura 22.

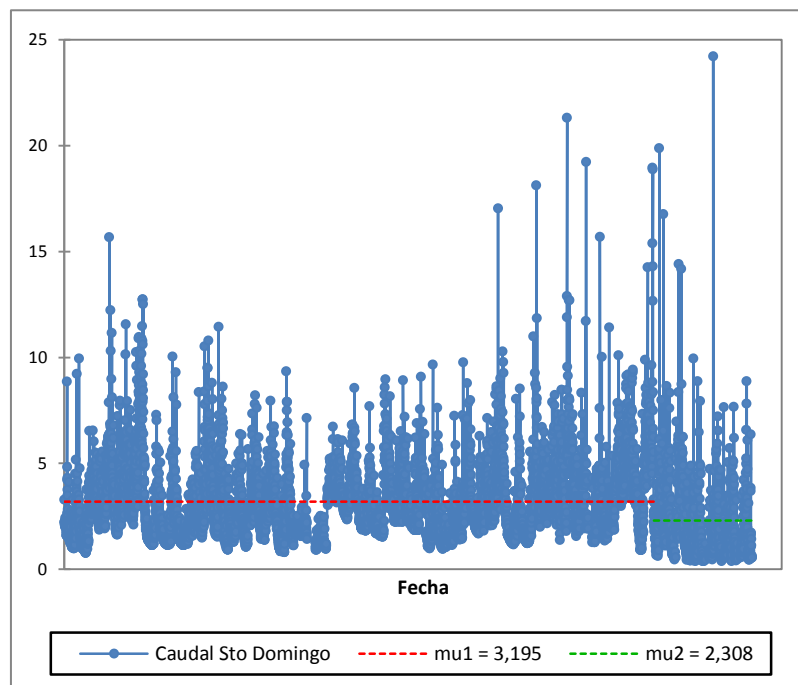


Figura 22 Resultado de la prueba de homogeneidad para los caudales del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo

3.2.3 Paso 3: Correlación con índices macroclimáticos

- **Proyecto Hidroeléctrico Mayaba**

Se elaboraron los correlogramas para los cuatro índices asociados al ENSO (SOI, SOI Anomaly, SST Niño 1+2, SST Niño 1+2 Anomaly) con rezagos de cero a seis meses

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

para los promedios mensuales de la estación San Juan (Figura 23) y la estación Tres y Medio (Figura 24). Luego de ser identificados los coeficientes de correlación de mayor magnitud, se realizó una regresión por mínimos cuadrados mediante la aplicación de la respectiva herramienta de Excel, que realiza la prueba F para determinar si la correlación está dada por el azar. Los resultados de esta prueba se sintetizan en la Tabla 8 y la Tabla 9 para las estaciones San Juan y Tres y Medio respectivamente, donde se resalta en rojo los coeficientes que presentan una prueba satisfactoria (la correlación no es por azar).

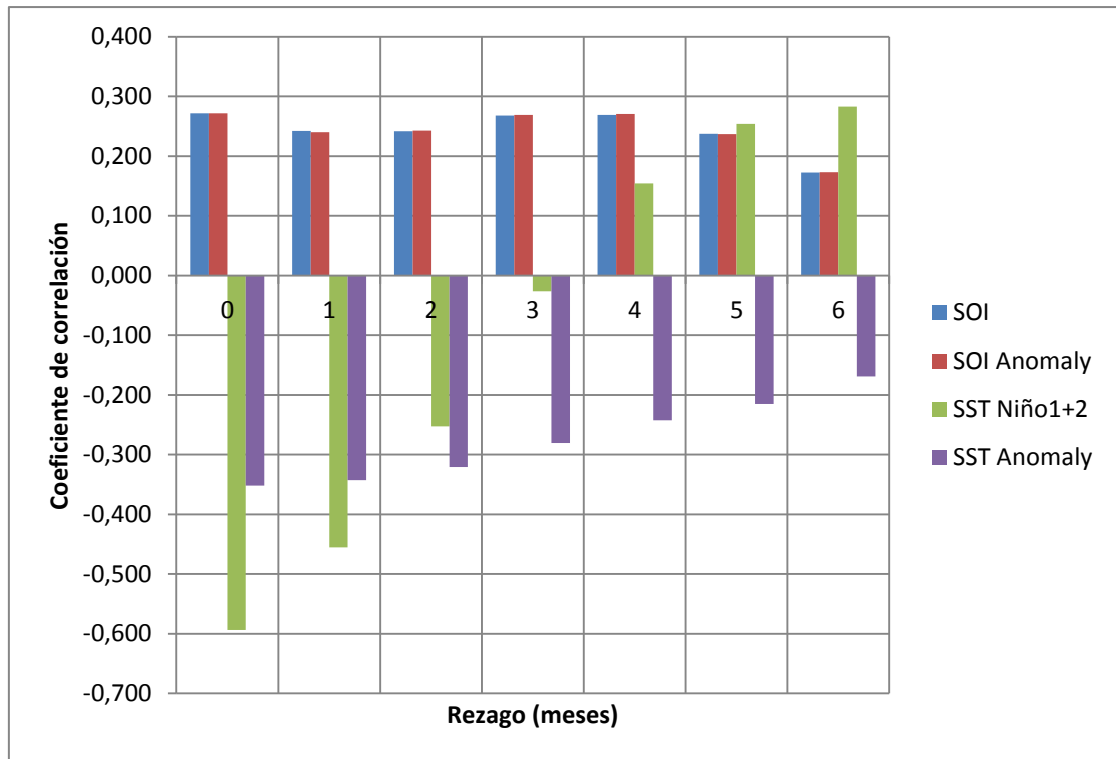


Figura 23 Correlograma con diferentes índices macroclimáticos para la estación San Juan

Tabla 9 Correlograma con diferentes índices macroclimáticos para la estación San Juan. En rojo los coeficientes que no están dados por el azar

Rezago (meses)	Coeficientes de correlación			
	SOI	SOI Anomaly	SST Niño1+2	SST Anomaly
0	0,272	0,272	-0,594	-0,352
1	0,242	0,240	-0,455	-0,343
2	0,242	0,242	-0,253	-0,321
3	0,268	0,269	-0,027	-0,281
4	0,269	0,270	0,154	-0,242
5	0,237	0,237	0,254	-0,215
6	0,172	0,173	0,283	-0,169

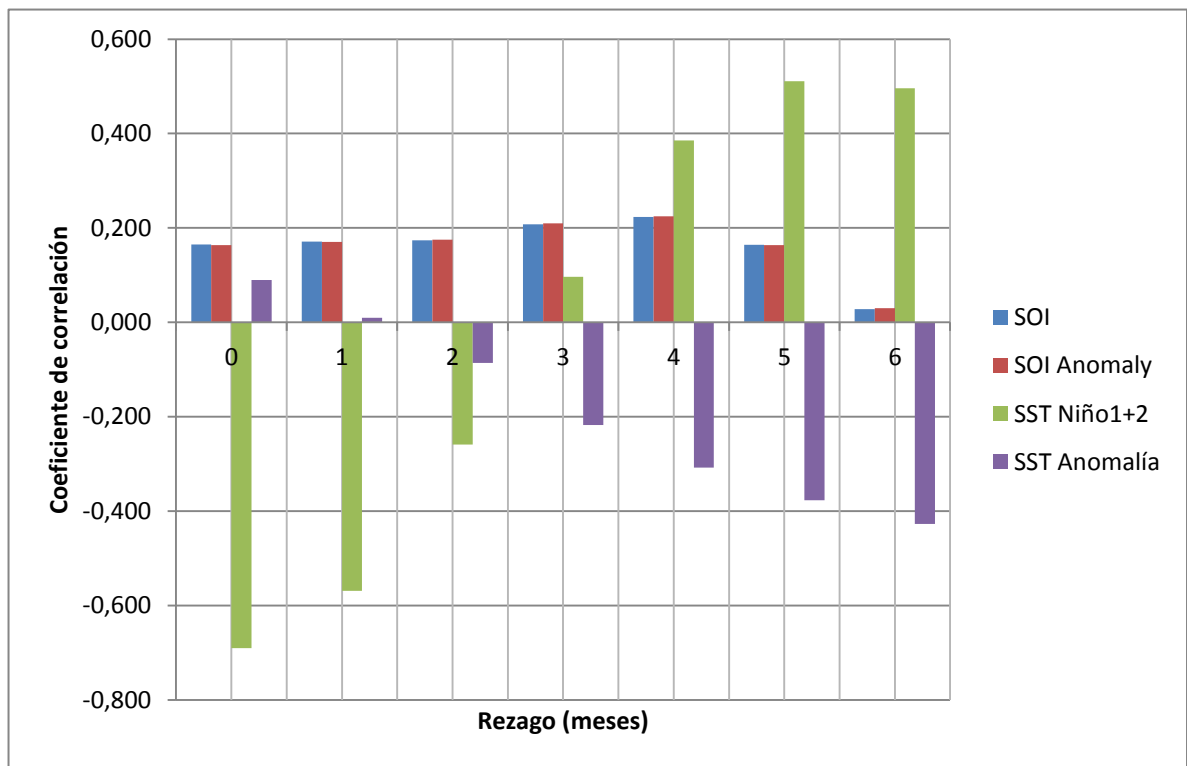


Figura 24 Correlograma con diferentes índices macroclimáticos para la estación Tres y Medio

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 10 Correlograma con diferentes índices macroclimáticos para la estación San Juan. En rojo los coeficientes que no están dados por el azar

Rezago (meses)	Coeficientes de correlación			
	SOI	SOI Anomaly	SST Niño1+2	SST Anomalía
0	0,165	0,163	-0,690	0,089
1	0,171	0,170	-0,569	0,010
2	0,174	0,175	-0,259	-0,086
3	0,208	0,210	0,097	-0,217
4	0,223	0,224	0,385	-0,308
5	0,164	0,164	0,511	-0,377
6	0,028	0,030	0,496	-0,427

Este procedimiento permite concluir que hay una alta influencia del fenómeno ENSO sobre los caudales del río Nechí. Sin embargo, por los bajos valores de los coeficientes de correlación encontrados, es posible afirmar que la relación no es lo suficientemente fuerte como para realizar un pronóstico de los caudales mediante regresión.

○ **Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo**

Se elaboraron los correlogramas para los cuatro índices asociados al ENSO (SOI, SOI Anomaly, SST Niño 1+2, SST Niño 1+2 Anomaly) con rezagos de cero a seis meses para los promedios mensuales de la serie considerada para el Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo. Luego de ser identificados los coeficientes de correlación de mayor magnitud, se realizó una regresión por mínimos cuadrados mediante la aplicación de la respectiva herramienta de Excel, que realiza la prueba F para determinar si la correlación está dada por el azar. Los resultados de esta prueba se sintetizan en la Tabla 10, donde se resalta en rojo los coeficientes que presentan una prueba satisfactoria (la correlación no es por azar).

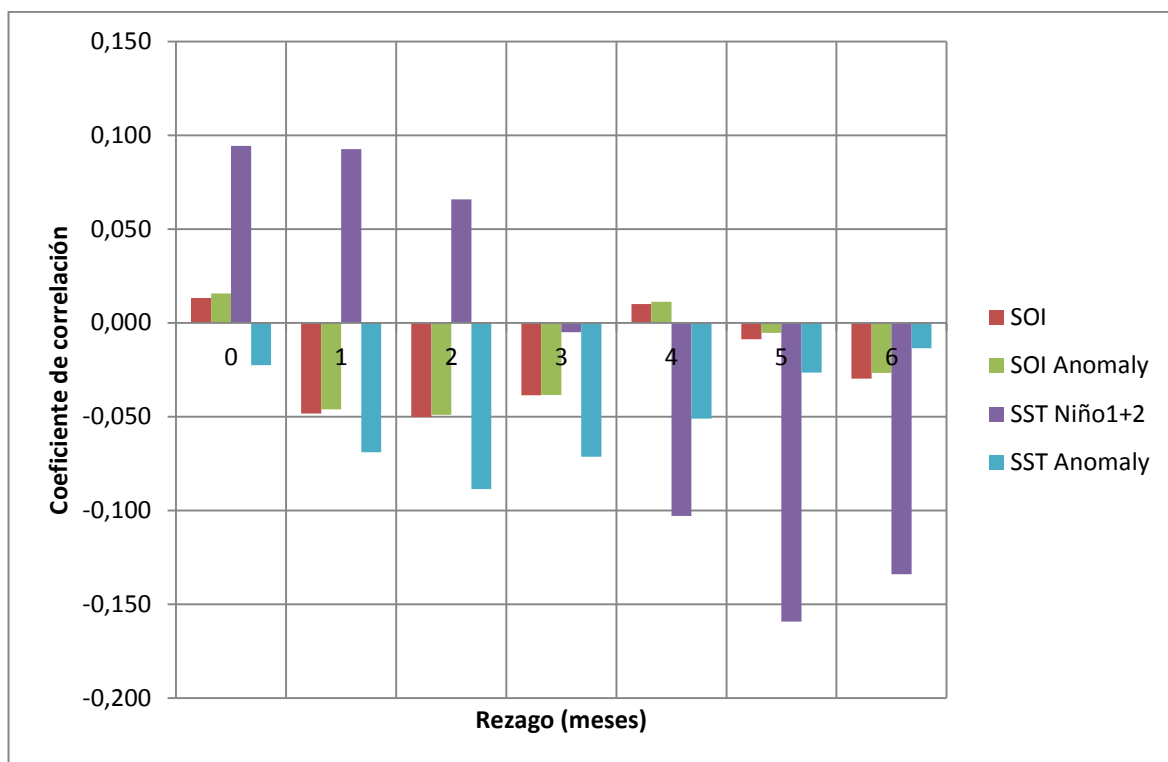


Figura 25 Correlograma con diferentes índices macroclimáticos para los caudales del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo

Tabla 11 Correlograma con diferentes índices macroclimáticos para los caudales del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo. En rojo los coeficientes que no están dados por el azar

Rezago (meses)	Coeficientes de correlación			
	SOI	SOI Anomaly	SST Niño1+2	SST Anomaly
0	0,013	0,016	0,094	-0,023
1	-0,048	-0,046	0,093	-0,069
2	-0,050	-0,049	0,066	-0,089
3	-0,039	-0,038	-0,005	-0,071
4	0,010	0,011	-0,103	-0,051
5	-0,009	-0,005	-0,159	-0,027
6	-0,030	-0,027	-0,134	-0,014

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.4 Paso 4: Clasificación de registros por condición hidrológica

Se realizó la clasificación del registro, según la Tabla 4, de la estaciones San Juan (rellena por regresión con los datos de la estación Tres y Medio) para el Proyecto Hidroeléctrico Mayaba y la estación Puente Carretera transpuesta, por condición hidrológica para los dos proyectos, con la que es posible realizar la estimación de los índices hidrológicos para cada mes y tres condiciones climáticas diferentes (Niño, Niña y Normal). Para esta se tuvo en cuenta el año hidrológico colombiano. Es de anotar que esta clasificación puede ser preliminar para el caso de Santo Domingo, pues la relación de los caudales con el río es débil, además del corto período de registro que no permite tener una muestra lo suficientemente grande para que existan numerosos Niños y Niñas, por lo que se puede incurrir en errores grandes de estimación, particularmente del índice Q95%.

3.2.5 Paso 5: Cálculo de índices hidrológicos

- **Proyecto Hidroeléctrico Mayaba**

Se realizó el cálculo de los dos diferentes índices hidrológicos, 7Q10 y Q95, para los registros clasificados por condición hidrológica la estación San Juan rellena. Para el 7Q10 se eligió la distribución de probabilidad de valores extremos de Gumbel, dado el ajuste satisfactorio (Figura 26) que presenta la serie de caudales semanales mínimos anuales.

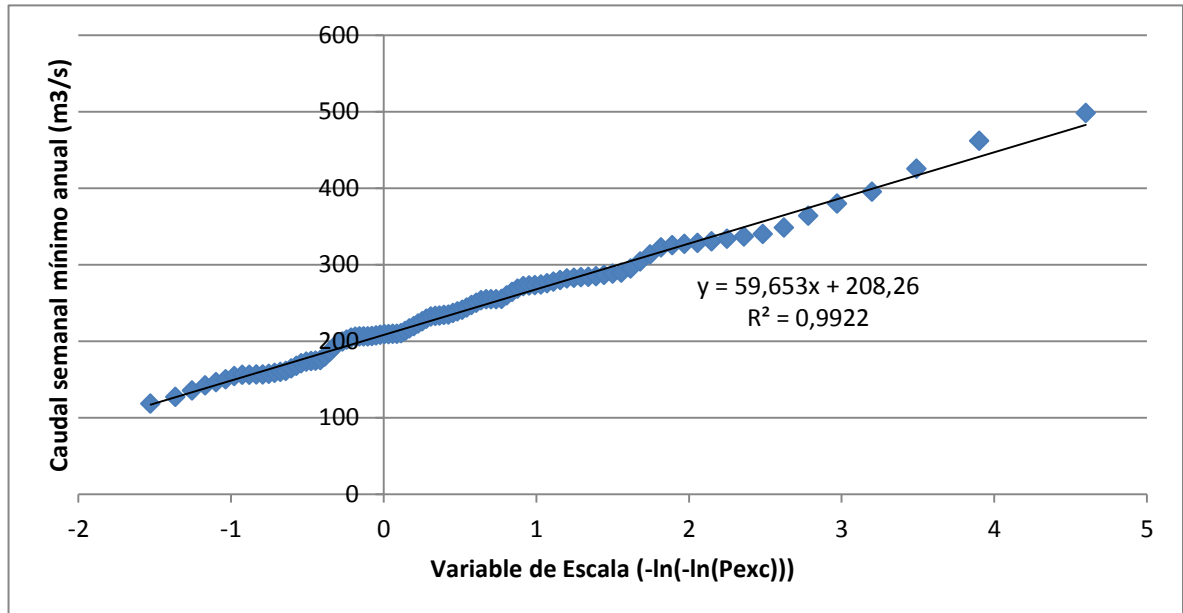


Figura 26 Ajuste a la distribución Gumbel por mínimos cuadrados de los caudales semanales mínimos anuales de la estación San Juan rellena

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Para el Q95 se obtuvieron las curvas de duración de caudales para los 12 meses y las condiciones Niño (Figura 27), Niña (Figura 28) y Normal (Figura 29).

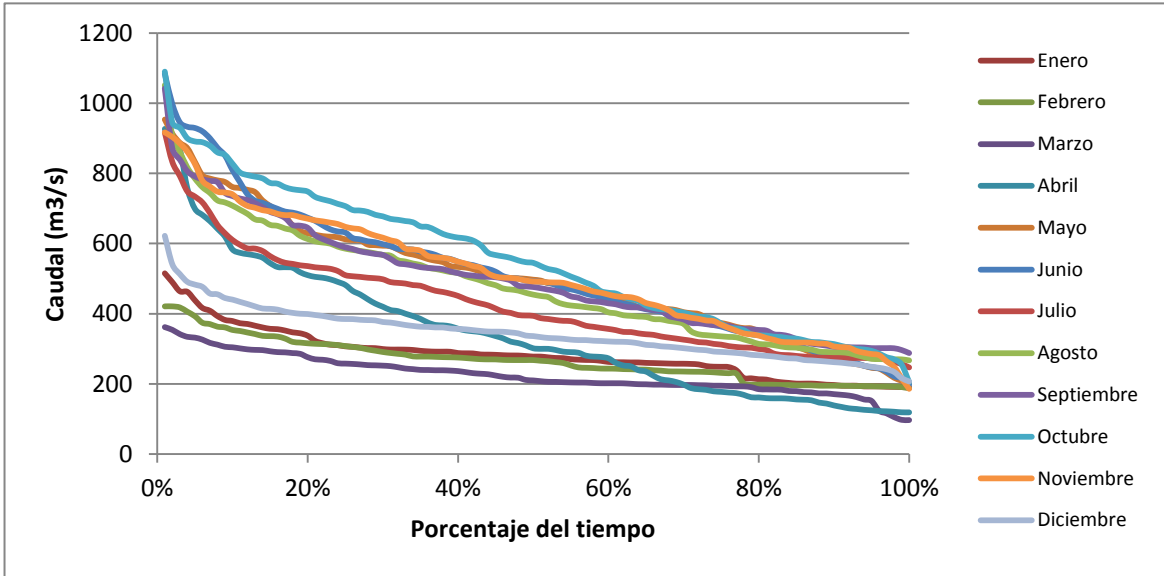


Figura 27 Curva de duración de caudales de la estación San Juan para los años Niño

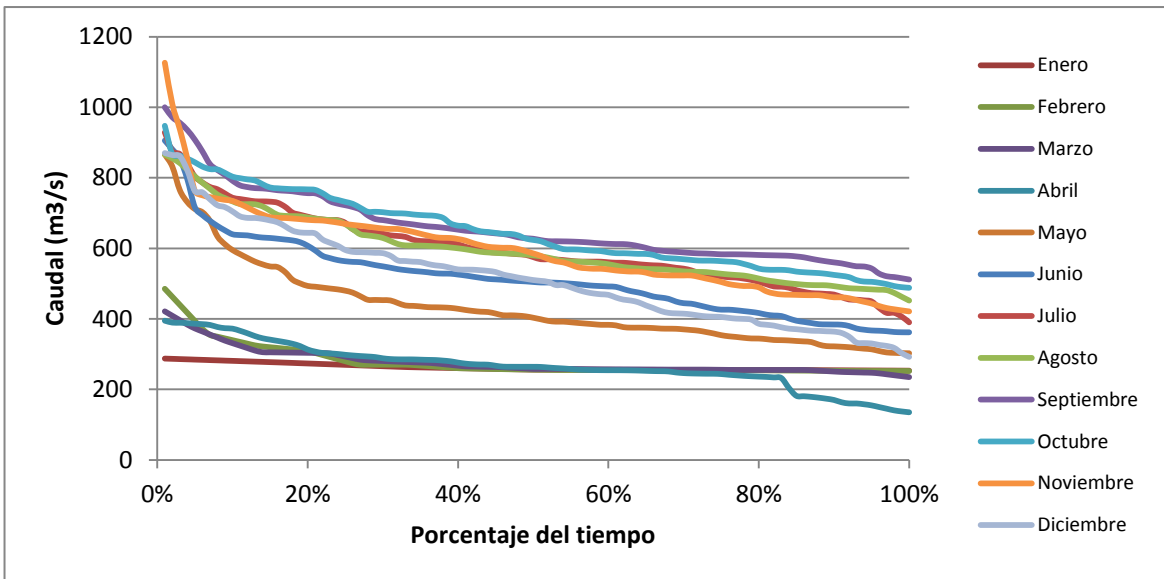


Figura 28 Curva de duración de caudales de la estación San Juan para los años Niña

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

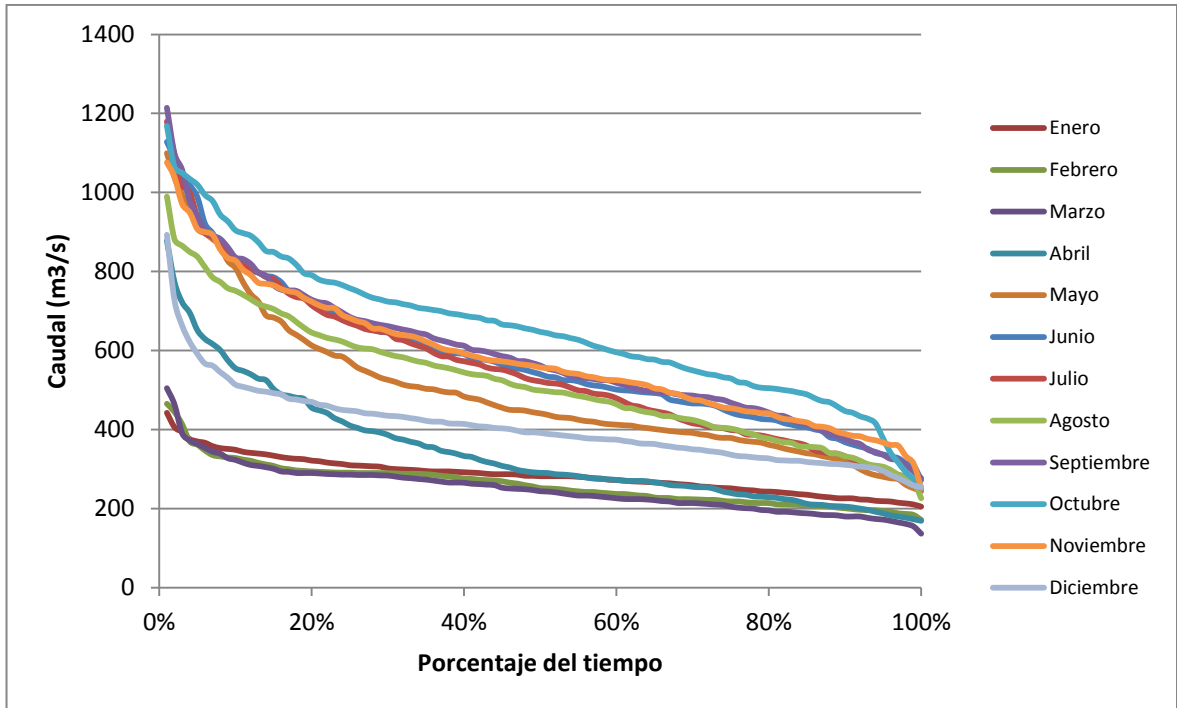


Figura 29 Curva de duración de caudales de la estación San Juan para los años Normales

Para finalizar, se realizó la propuesta de caudal ambiental como el máximo resultante de comparar los índices 7Q10 y Q95 para cada mes y condición hidrológica. El resultado se presenta en la Figura 30, la Figura 31 y la Figura 32 respectivamente para los años Niño, Niña y Normal, en las que se pueden observar los dos índices hidrológicos.

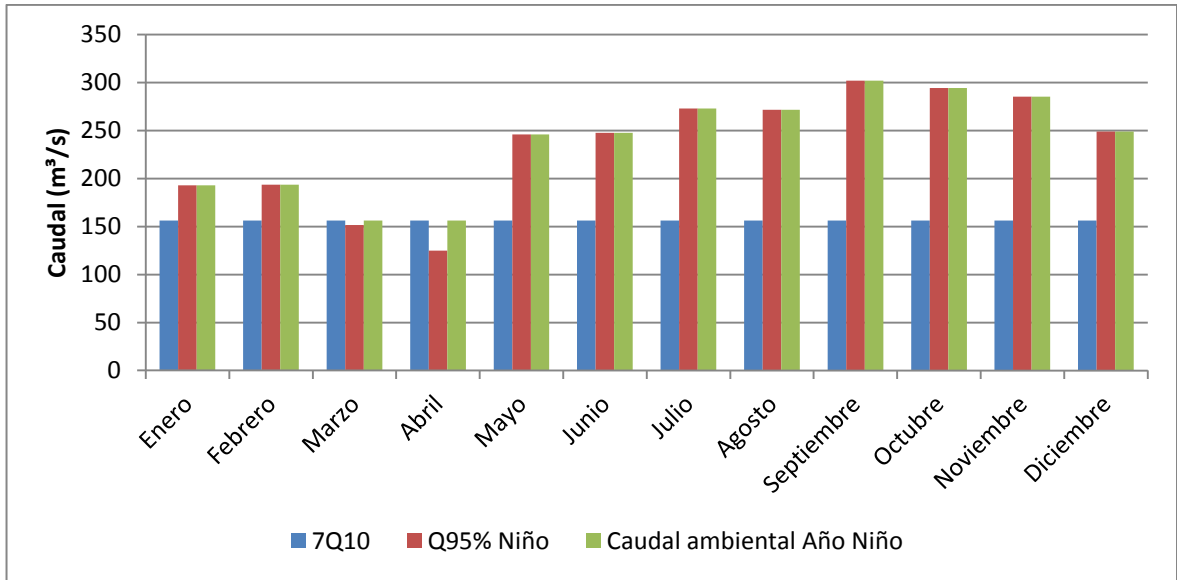


Figura 30 Propuesta de caudal ambiental del Proyecto Hidroeléctrico Mayaba para los años Niño

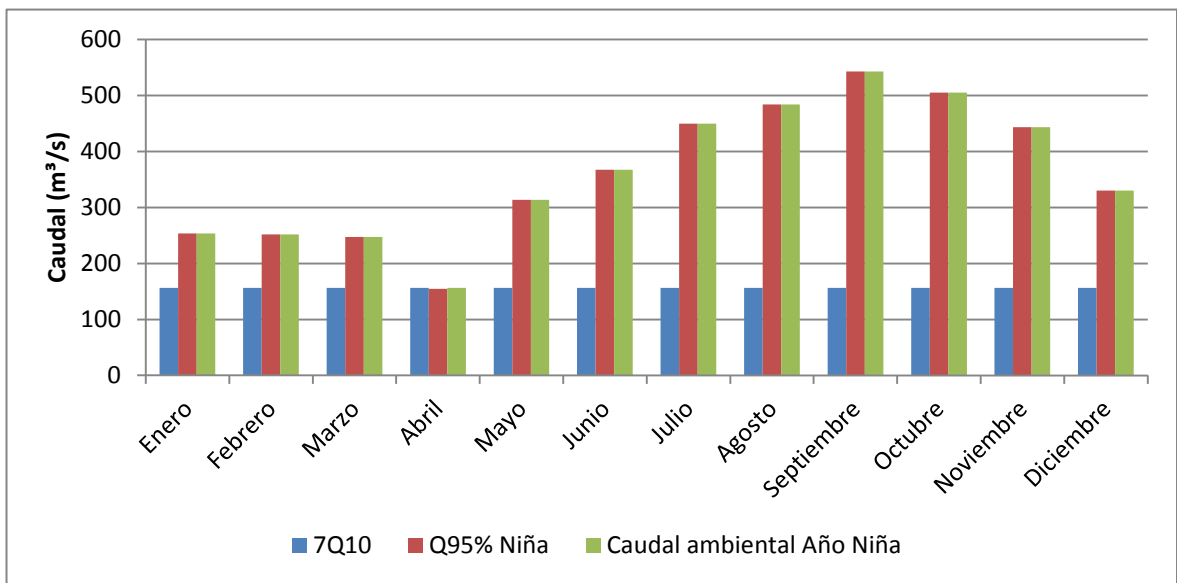


Figura 31 Propuesta de caudal ambiental del Proyecto Hidroeléctrico Mayaba para los años Niña

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

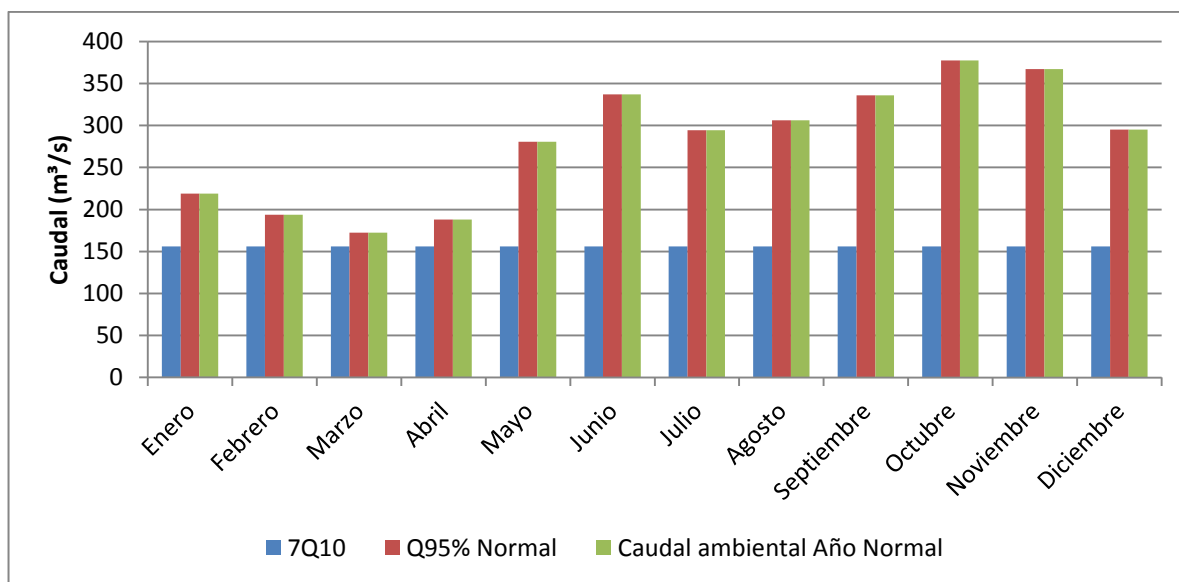


Figura 32 Propuesta de caudal ambiental del Proyecto Hidroeléctrico Mayaba para los años Normales

○ **Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo**

Se realizó el cálculo de los dos diferentes índices hidrológicos, 7Q10 y Q95, para los registros clasificados por condición hidrológica a la estación San Juan rellena. Para el 7Q10 se eligió la distribución de probabilidad de valores extremos de Gumbel, dado el ajuste satisfactorio (Figura 33) que presenta la serie de caudales semanales mínimos anuales.

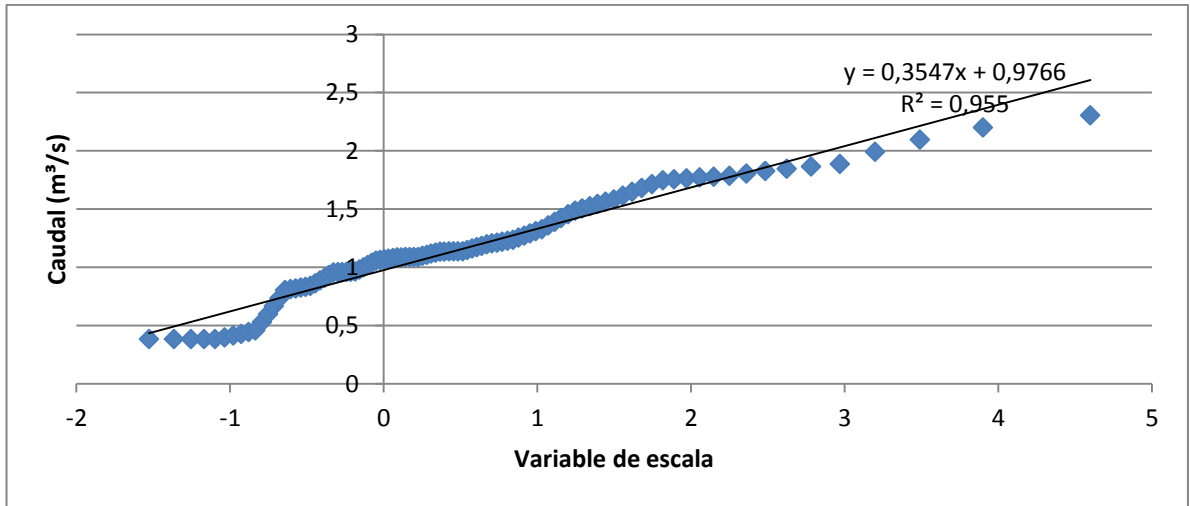


Figura 33 Ajuste a la distribución Gumbel por mínimos cuadrados de los caudales semanales mínimos anuales de la serie de caudales del Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo

Para el Q95 se obtuvieron las curvas de duración de caudales para los 12 meses y las condiciones Niño (Figura 34), Niña (Figura 35) y Normal (Figura 36).

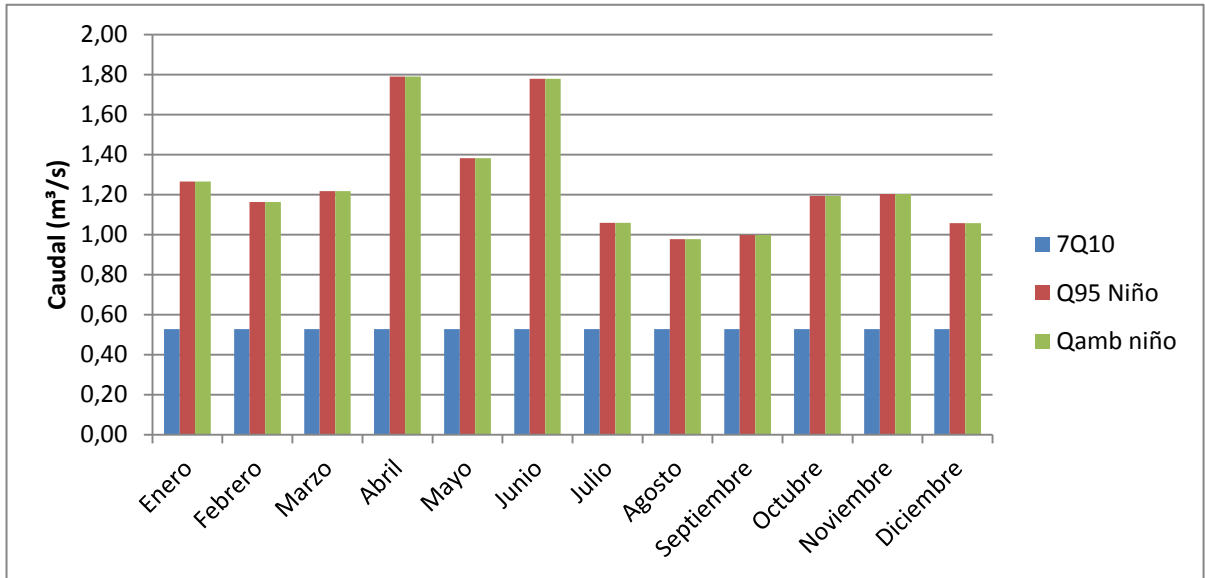


Figura 34 Propuesta de caudal ambiental del el Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo para los años Niño

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

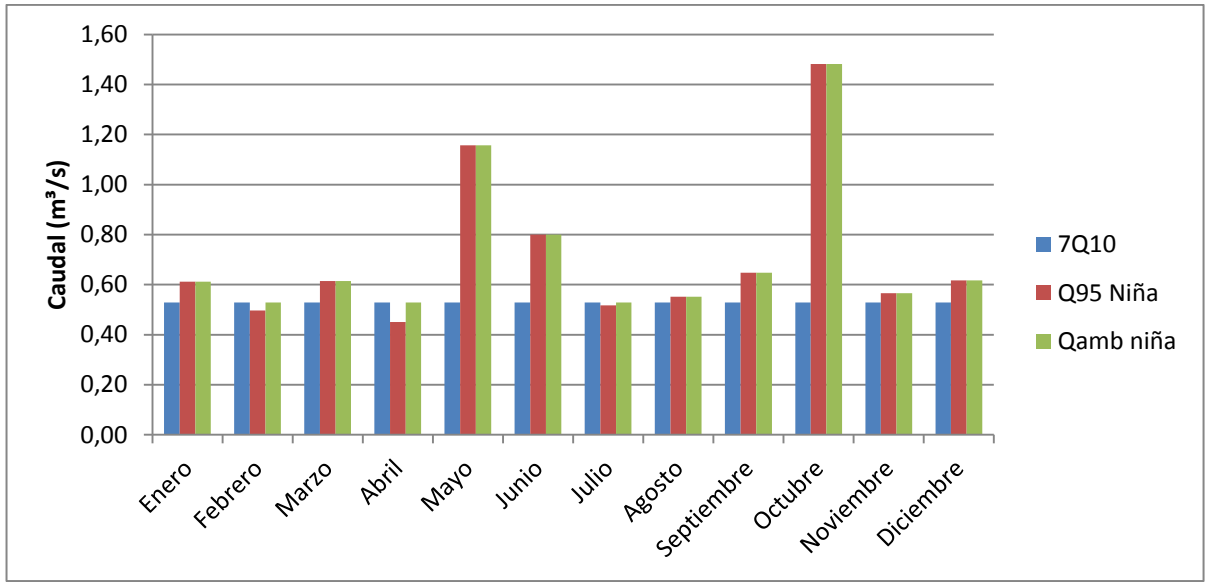


Figura 35 Propuesta de caudal ambiental del el Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo para los años Niña

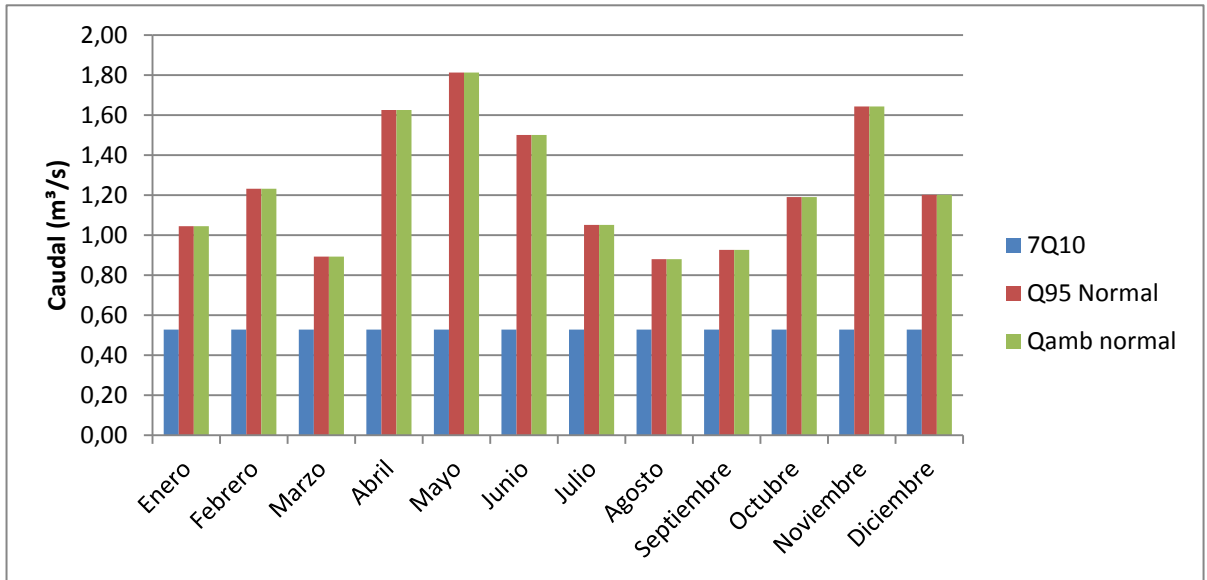


Figura 36 Propuesta de caudal ambiental del el Proyecto Hidroeléctrico Santo Domingo para los años Normales

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4. DISCUSIÓN

Como se ha venido discutiendo a lo largo de este documento, la metodología para la estimación de caudales ambientales de proyectos hidroeléctricos adoptada por el MADS es del tipo holístico, completa en su estructura, pero con falencias para la generalización en el entorno colombiano y en la tipología de los proyectos. A continuación se hace una discusión de cada uno de los elementos analizados de esta metodología, haciendo énfasis en las variables hidrológicas de la misma.

Posteriormente, y como objetivos logrados en este trabajo de investigación, se discuten los resultados obtenidos del análisis hidrológico de 39 estaciones limnimétricas y limnigráficas localizadas en regiones con potencial hidroenergético medio alto y alto.

4.1 Discusión sobre el análisis de la metodología para la estimación de caudales ambientales de proyectos hidroeléctricos del MADS

4.1.1 Acerca de la aplicabilidad de los criterios hidrológicos de la metodología MADS

- **Criterios específicos de la zona de estudio**

Como se mencionó anteriormente, la metodología MADS solo indica los criterios que deben tenerse en cuenta para la estimación de caudal ambiental de proyectos hidroeléctricos en operación, pero no precisa que dichos criterios deben ser analizados en función del tipo de proyecto. Proyectos con regulación deberán considerar criterios diferentes a los proyectos a filo de agua. Proyectos en operación deben tener en cuenta criterios diferentes a los proyectos en etapa de planeamiento.

En particular, la capacidad de recuperación de la cuenca debe ser una variable importante dentro de cualquier metodología para la estimación de caudales ambientales. Una cuenca en La Guajira, por ejemplo, no podría tener la misma necesidad de caudal ambiental como otra en Chocó; la primera de ellas requeriría más caudal ambiental debido a su alta sensibilidad a la reducción en los volúmenes de agua.

La densidad de la red de drenaje puede explicar esta capacidad de recuperación de la cuenca; sin embargo, esta considera elementos geológicos, geomorfológicos y geotécnicos además de los hidrológicos, lo que haría difícil el análisis con esta variable. El rendimiento hídrico de las cuencas puede explicar más fácilmente esa capacidad de recuperación de la cuenca. Se ha demostrado que las zonas con potencial hidroenergético medio-alto y alto, las de interés para la metodología analizada, tienen

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

diferencias en el rendimiento hídrico del orden de $175 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$ suficiente como para tener que incluir una ponderación del caudal ambiental entre ellas.

Se plantea que para cada de una de estas regiones se deben modificar los criterios utilizados en la metodologías de estimación de caudal ambiental de forma que este sea función directa de la capacidad de recuperación de la cuenca, o lo que es lo mismo, función directa del rendimiento medio de la cuenca. Por tanto, será necesario plantear unos valores de afectación a los índices hidrológicos, que sean congruentes con criterios biológicos. Si bien se reconoce esta falencia en la metodología del MADS, la propuesta de mejora involucra un alcance superior a la de este trabajo de grado, por lo que se deja abierta a discusión y a investigación futura.

○ **Criterios hidrológicos**

Longitud y disponibilidad de información

Para analizar este criterio se empleó la información hidrológica disponible en Colombia, y su correlación con el potencial hídrico, con el fin de determinar el porcentaje de estaciones que cumplen con lo propuesto en la metodología MADS.

Se encontró que el 90% de las estaciones de medición de caudal disponibles en el IDEAM, que además se encuentran en una región con algún potencial hidroeléctrico, cuentan con más de 10 años de período de registro. Sin embargo, teniendo en cuenta la exigencia de que las series deben tener no más del 10% de datos faltantes, el universo de información se reduce al 29% del total de información con la que se cuenta en las regiones de interés para la localización de un proyecto hidroeléctrico.

La solución al problema que expone el grupo de investigación autor de la metodología sería la instalación de las estaciones de caudal particularmente para cada proyecto. Los autores de la metodología exponen que esto no sería excesivo y podría ser cumplido en la mayoría de los casos (Grupo de Investigación en Recursos Hídricos, 2008), premisa que se cuestiona en proyectos hidroeléctricos en planeamiento. Esto retrasaría el desarrollo de nuevos proyectos por lo menos 10 años, que es el tiempo de registro mínimo requerido, argumentado sobre la premisa que las etapas tempranas de desarrollo hasta la fase de diseños detallados tienen una duración cercana a los 10 años.

Transposición de caudales

Teniendo en cuenta el análisis realizado en el numeral 2.1.2, además conociendo que una metodología para estimar caudales ambientales no debe desconocer las cuencas con información escasa (Redondo Tilano, 2011), que es el caso de un gran número de corrientes atractivas para el desarrollo hidroeléctrico, se considera el método de transposición de caudales como válido para estos casos, siempre y cuando se reconozcan sus limitaciones y se cuente con información confiable para su utilización.

Este método consiste en trasladar la información sobre los caudales de una cuenca a otra, afectando la información por un factor de transposición. Este último, puede ser

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

obtenido por la relación de áreas de las cuencas cuando la precipitación y la evapotranspiración son similares, o por las tres variables cuando no.

Acerca de este método, es de vital importancia contar con información espacial de precipitación y evapotranspiración con un grado alto de confiabilidad, problema que en algunas zonas se encuentra resuelto con cierta satisfacción en la base de datos desarrollada para la plataforma HidroSIG (Álvarez, 2007), (Álvarez-Villa, Vélez, & Poveda, 2010).

Homogeneidad y consistencia

Se ha demostrado, con el análisis de homogeneidad y de consistencia de 39 series limnimétricas y limnigráficas que un porcentaje muy bajo de ellas pasa las pruebas utilizadas. Esto indica que existe un error generalizado en el registro de los datos o, como dicen diferentes autores, hay evidencias de cambio climático en la región andina colombiana. Esto último parece ser más preciso, por cuanto se han notado tendencias de largo plazo no solo en los registros de caudal sino también en las series de otras variables climáticas (precipitación, temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa y evapotranspiración).

Dados los resultados obtenidos, es de esperar que esta variable influya en mayor medida los caudales ambientales de proyectos como los evaluados que muchas de las variables incluidas en la metodología MADS.

Concretamente, se propone que el caudal sea actualizado año a año según el valor de referencia propuesto y que es particular para cada corriente, con la información limnimétrica disponible del año anterior con el fin de que los caudales ambientales cambien conforme a la tendencia de la corriente, conservando la relación constante entre el caudal ambiental y el valor del índice hidrológico a considerar.

Índices hidrológicos y alteración máxima de la curva de duración de caudales

Se ha evidenciado que los índices hidrológicos utilizados en la metodología MADS no representan correctamente las condiciones de las cuencas colombianas.

Si se asume que los caudales ambientales deben obedecer al comportamiento de los caudales mínimos históricos, el índice de referencia de cualquier metodología debería estar asociado a un valor indicador de cada cuenca en particular. Es decir, debería considerarse un índice para cada cuenca según sea el comportamiento probabilístico de los caudales de la misma. Por lo tanto, se propone como Valor de Referencia Hidrológico el caudal que representa el umbral a partir del cual se pueden caracterizar los caudales mínimos, es decir, el caudal máximo de los mínimos. Este, para las estaciones analizadas, está más cerca de ser el Q98, es decir el caudal de ser excedido el 98% del tiempo, que de otro valor índice. Entonces el índice hidrológico podría expresarse como un porcentaje de descuento sobre este valor de referencia y así se incluiría la forma probabilística de la serie de caudales en la estimación del caudal ambiental.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Se considera pertinente que las autoridades ambientales trabajen en la obtención de un índice hidrológico asociado a los objetivos ambientales como se ha realizado a nivel mundial y no utilizar los que han sido desarrollados para otras latitudes. Para esto es necesario relacionar diferentes estados ecológicos con magnitudes de caudal, considerando objetivos ambientales claros y definidos, relacionándolas con algún estadístico del comportamiento temporal del flujo. En este trabajo se realiza una propuesta de considerar un valor de referencia igual al máximo de los caudales mínimos, como indicador del comportamiento temporal de la corriente, estimado mediante el análisis del ajuste a funciones de densidad de probabilidad. Mientras tanto, los gestores del agua deben tomar decisiones al respecto del desarrollo relacionado a las fuentes hídricas (García de Jalón & González del Tánago, 2004).

4.2 Discusión sobre el análisis hidrológico de 39 estaciones limnimétricas y limnigráficas de regiones con potencial hidroenergético medio-alto y alto.

4.2.1 Acerca de las pruebas de homogeneidad y consistencia de 39 series limnimétricas y limnigráficas

Es evidente que la información hidrológica en Colombia carece de homogeneidad y consistencia, situación que puede ser explicada por la existencia de cambio climático en Colombia y no puede constituir una limitante para el planeamiento de centrales hidroeléctricas, actividad que finalmente responde a las necesidades de la población. Sin embargo, no se puede negar la necesidad de mejorar las actividades de la red hidrometeorológica del IDEAM, que finalmente constituyen un servicio a los diferentes actores del desarrollo.

4.2.2 Acerca de la tendencia de 39 series limnimétricas y limnigráficas

Se ha evidenciado que tanto los caudales mínimos como los medios y los máximos presentan tendencias crecientes o decrecientes, que pueden depender de la zona, el tamaño, torrencialidad y las características particulares de las diferentes corrientes colombianas. No se puede desconocer este fenómeno ni explicarlo solamente como errores de medición.

4.2.3 Acerca de los umbrales de los caudales mínimos de 39 series limnimétricas y limnigráficas

A la hora de analizar distribuciones de probabilidad de los registros de las series de caudal, es de particular importancia conocer que en una misma serie existen familias diferentes de los datos. Por los resultados de este trabajo, en donde se exponen los umbrales que definen el comportamiento de los caudales mínimos de las estaciones consideradas, se puede evidenciar una tendencia general de los caudales a presentar un umbral equivalente al Q98.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La metodología MADS no es aplicable a todo tipo de proyectos en el contexto colombiano. Esto es, propone una serie de procedimientos exigentes en calidad de información de difícil consecución para el planeamiento de centrales hidroeléctricas, específicamente tipo PCH y a pie de presa. Se demostró que solamente el 29% de las estaciones de medición de caudal localizadas en las regiones de interés para este tipo de proyecto cumplen con los requisitos preliminares que solicita dicha metodología.
- Los impactos ocasionados por la extracción de caudal son dependientes de la capacidad de recuperación de la hoya afectada, que depende a su vez del rendimiento hídrico regional. Como se expone en el trabajo, en Colombia, una región con potencial hidroenergético medio-alto tiene rendimiento hídrico del orden de 40-50 l.s⁻¹.km⁻², mientras que una región con potencial alto presenta rendimientos superiores a los 200 l.s⁻¹.km⁻². Por esto, debe ser una variable que afecte la estimación del caudal ambiental en proyectos hidroeléctricos de diferente tipología, de tal forma que también se relacione con criterios biológicos.
- Los índices 7Q10 y Q95, así como la mayoría de índices hidrológicos, han sido obtenidos para objetivos propios regionales en relación a lo ecológico, además de lugares con condiciones muy diferentes a las colombianas. Por esto se consideran inadecuados para los ríos colombianos. Mediante el análisis de 39 estaciones de medición de caudal localizadas en Colombia, se concluye que el umbral de los caudales mínimos está, en un 67,6% de los casos alrededor del Q98.
- Como se confirma en el análisis de 39 estaciones limnimétricas y limnigráficas, la información hidrológica presenta tendencias crecientes y decrecientes en los caudales mínimos, medios y máximos. Estas pueden explicarse por el cambio histórico de las condiciones climáticas, más asociado con tendencias regionales de largo plazo que a otros factores. Por esto, se propone que los caudales ambientales sean actualizados año a año, con el recálculo del valor de referencia con la inclusión de datos históricos nuevos. Así lograría emularse la tendencia de la corriente, y se dejaría de considerar como errores de medición.

5.2 Recomendaciones

- Es importante que se relacionen los diferentes comportamientos hidrológicos de los caudales con las variables bióticas en Colombia, en particular, la definición numérica de la variabilidad de la estimación del caudal ambiental según la capacidad de recuperación de la cuenca.
- Es necesario que se confirme, con más datos, el Q98 como un valor que logre explicar el comportamiento de los caudales mínimos en Colombia y pueda ser incluido en estimaciones de caudal ambiental.
- Es pertinente que se analicen otras variables físicas, hidráulicas y geomorfológicas, para lograr una comunicación interdisciplinaria en la estimación de caudales ambientales.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso-González, C., Gortázar, J., Baeza Sanz, D., & García de Jalón, D. (2008). Dam function rules based on brown trout flow. *Hydrobiología*, 253-262.
- Álvarez, O. (2007). Cuantificación de la Incertidumbre en la Estimación de Campos Hidrológicos. Aplicación al Balance Hídrico de Largo Plazo. *Tesis de maestría*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Álvarez-Villa, O., Vélez, J., & Poveda, G. (2010). Improved long-term mean annual rainfall fields for Colombia. *Int. J. Climatol.*
- Bedoya Soto, J. M. (2005). *Estudio de metodologías para establecer caudales ecológicos y su aplicación en la cuenca Doña María*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- Cantor Gómez, D., & Ochoa Jaramillo, A. (2011). Señales de cambio climático en series de lluvia en Antioquia. En U. nacional (Ed.). Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 2 de 05 de 2013, de Universidad Nacional de Colombia: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4155/>
- Carmona, A., & Poveda, G. (2011). Detection of longterm trends in monthly hydroclimatic records of Colombia and the Amazon River basin through Empirical Mode Decomposition. *Fall Meeting of the American Geophysical Union*. San Francisco.
- Carrascal, D. R. (6 de junio de 2013). Fenómenos macroclimáticos. (G. Álvarez, Entrevistador)
- Carvajal, Y. (2007). El régimen de caudal ambiental en el marco de la gestión. Universidad del Valle.
- Castro Heredia, L. M., Carvajal Escobar, Y., & Monsalve Durango, E. A. (2006). Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. *Ingeniería y Universidad vol 10*.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (2000). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGRAW-HILL.
- Diez Hernández, J. M., & Burbano Burbano, L. (2006). Técnicas avanzadas para la evaluación de caudales ecológicos en el ordenamiento sostenible de cuencas hidrográficas. *Ingeniería e investigación*, 58-68.
- Diez Hernández, J. M., & Olmeda Sanz, S. (Julio de 2008). Diseño eco-hidrológico de pequeñas centrales hidroeléctricas: evaluación de caudales ecológicos. *Revista Energética Número 39(39)*, 65-76.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Ecovive. (06 de enero de 2013). *Ecovive*. Obtenido de www.ecovive.com
- EIA. (1 de junio de 2013). *Mecánica de fluidos y Recursos Hidráulicos*. Obtenido de fluidos.eia.edu.co
- García de Jalón, D., & González del Tánago, M. (2004). El concepto del caudal ecológico y criterios para su aplicación en los ríos Españoles. *IV Congreso Ibérico sobre gestión y Planificación del Agua*. Tortosa: Universidad Politécnica de Madrid.
- Grecco, A. (2005). Metodología para la determinación del caudal de garantía ambiental. *Revista Empresas Públicas de Medellín (15)*, 153-173.
- Grupo de Investigación en Recursos Hídricos. (2008). *Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Gumbel, E. (1956). Méthodes graphiques pour l'analyse des débits de crue. *La Huille Blanche N°5*.
- King, J., Tharme, R., & Villiers, M. (2008). *Environmental flow assesments for rivers: Manual for the Building Block Methodology*. Cape Town: Water Research Comission.
- López Díaz, J. A. (2004). Problemática de la homogeneidad. Disponibilidad de datos en España para escenarios. Unidad de técnicas climatológicas. Instituto Nacional de Meteorología.
- MADS. (2 de marzo de 2013). *Minambiente*. Obtenido de Misión y visión: <http://www.minambiente.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=463&conID=1074>
- Martínez Santa-María, C., & Fernández Yuste, J. A. (2008). *Índices de Alteración Hidrológica en Ríos, Manual de referencia metodológica*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente de España, Universidad Politécnica de Madrid.
- Mesa, D. J. (2009). Algunos atributos a favor y en contra en las técnicas y métodos utilizados para la estimación de caudales ambientales en Colombia. *Umbral Científico número 15*, 81-93.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (15 de 5 de 2013). *Monthly Atmospheric and SST Indices*. Obtenido de <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>
- Pérez, C., Poveda, G., Mesa, O., Carvajal, L., & Ochoa, A. (1998). Evidencias de cambio climático en Colombia: Tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual. *Bulletin de l'Institut Francais d'Études Andines, Tomo 27, número 3*, 537-546.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Ciencias de la Tierra*, 201-222.
- Poveda, G. (2010). Efecto del cambio climático y la deforestación sobre los recursos hídricos en Colombia. *Reunión Internacional sobre Cambio Climático y el Sector Agropecuario*. Bogotá.
- Poveda, G., & Álvarez, D. (enero - junio 2012). El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática: implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería. *Revista de Ingeniería*, p 65-76. 12 p. .
- Pyrce, R. (2004). *Hydrological Low Flow Indices and their Uses*. Ontario: Watershed Science Centre.
- Rave, C., Poveda, G., & Mantilla, R. (2001). Tendencias en la distribución de probabilidades de lluvias y caudales en Antioquia. *Meteorología Colombiana*, 53-60.
- Redondo Tilano, S. (2011). Incertidumbre hidrológica en la estimación de caudales ambientales mediante metodologías basadas en series históricas. *Tesis de Maestría*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Rivera, H., Marín Ramírez, R., & Vanegas, R. (2004). *Metodología de cálculo del índice de escasez*. Bogotá: instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- Shalahuddin-Hasan. (1 de junio de 2013). *Blog Shalahuddin-Hasan*. Obtenido de shalahuddin-hasan.blogspot.com
- Smith, R., Vesga, D., & Cadena, A. (2006). El futuro de la hidroelectricidad: escenarios energéticos para Colombia. *XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, (págs. 15-16). Popayán, Colombia.
- UPME. (2002). *Plan de cobertura de energía eléctrica*. Bogotá.
- Zapata G., G. J. (2008). *El Caudal ecológico en los diseños de proyectos hidroeléctricos- Algunas consideraciones*. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Medellín.

ANEXO 1. PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD Y CONSISTENCIA

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ANEXO 2. TENDENCIA EN LOS PERCENTILES MEDIOS DE LAS SERIES DE CAUDAL

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ANEXO 3. UMBRALES DE MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LAS ESTACIONES DE CAUDAL

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

ACTA DE EVALUACIÓN FINAL
DE TRABAJO DE GRADO

Fecha: (dd/mm/aa)							
Nombre del proyecto:	<i>Análisis de los Criterios físicos de la metodología para la estimación de caudales ambientales del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible . Casos proyectos hidroeléctricos Mayaba y Santo Domingo</i>						
Director del proyecto:	<i>Pablo Agudelo Restrepo. PhD (c). Externo.</i>						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nombre del estudiante</th> <th>Programa académico</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><i>Gabriel Hernán Álvarez Montoya</i></td> <td><i>Ingeniería Civil</i></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Nombre del estudiante	Programa académico	<i>Gabriel Hernán Álvarez Montoya</i>	<i>Ingeniería Civil</i>		
Nombre del estudiante	Programa académico						
<i>Gabriel Hernán Álvarez Montoya</i>	<i>Ingeniería Civil</i>						
Nombre del Jurado:	<i>Juan Fernando Barros</i>						
Evaluación del proyecto:							
<input type="checkbox"/> No aprobado <input checked="" type="checkbox"/> Aprobado							
Espacio exclusivo para jurado							
<input type="checkbox"/> Mención Pública <input type="checkbox"/> Mención honorífica <input type="checkbox"/> Trabajo laureado							
Justificación del reconocimiento: (Artículo 28 del Acuerdo 11: "El director del Programa presentará el acta final de evaluación al Consejo Académico, donde consta la solicitud de mención especial debidamente justificada y el Consejo determinará si se otorga o no")							

[Signature]

Director del Programa

[Signature]

Director del Trabajo de Grado

[Signature]

Jurado