

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN Y  
CUANTIFICACIÓN DE LA ALTERACIÓN DEL RÉGIMEN DE  
CAUDALES DE CORRIENTES ALTERADAS  
ANTRÓPICAMENTE, CASO URRÁ I.**

Tesis de maestría

**Autor: Andrés Julián Vélez Flórez**

Director:

Jaime Ignacio Vélez U.

Octubre 2009

POSGRADO EN APROVECHAMIENTO DE RECURSOS HIDRÁULICOS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE MINAS  
MEDELLÍN

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1-1</b>
<b>2 MARCO TEÓRICO</b>	<b>2-1</b>
2.1 Construcción de Embalses, Operación e Impactos Ambientales	2-1
2.2 Alteración del Régimen Hidrológico	2-1
2.2.1 METODOLOGÍA IHA	2-4
2.2.2 METODOLOGÍA RVA (Range of Variability Approach)	2-5
2.2.3 METODOLOGÍA EFC (Environmental Flow Component)	2-8
2.3 Alteraciones Geomorfológicas	2-11
2.4 Cambios en la Vegetación y Ecosistemas Riparios	2-13
2.5 Alteraciones en las Dinámicas Socio Económicas	2-14
2.6 Problemas Ambientales y Embalses en Colombia	2-16
<b>3 ANÁLISIS METODOLÓGICO</b>	<b>3-1</b>
3.1 Metodología IHA	3-1
3.1.1 Beneficios	3-3
3.1.2 Falencias	3-4
3.1.3 Aplicabilidad	3-5
3.1.4 Software	3-5
3.2 Propuesta Metodológica AVFD	3-6
3.2.1 Análisis de las características generales de las curvas naturales de caudales y niveles a través del ciclo anual	3-6
3.2.2 Cambios en la recesión de los caudales y acción pulsátil de la operación de embalse	3-7
3.2.3 Estimación cambios la variabilidad de las magnitudes de los caudales	3-7
3.2.4 Estimación de los cambios en las frecuencias y duraciones de los eventos	3-8
3.2.5 Análisis de la variabilidad diaria histórica vs variabilidad horaria	3-14
3.3 Información Disponible	3-14
3.3.1 Registros Diarios	3-14
3.3.2 Registros Horarios	3-15

<b>4 ALTERACIÓN DEL RÉGIMEN DE CAUDALES CASO URRÁ I</b>	<b>4-1</b>
4.1 Generalidades	4-1
4.1.1 Localización de la zona de estudio	4-1
4.1.2 Descripción del proyecto Hidroeléctrico URRÁ I	4-2
4.1.3 Problemática asociada	4-6
4.1.4 Marco legal de operación	4-6
4.1.5 Mercado energético	4-12
4.2 Metodología (IHA) Índices de Alteración Hidrológica	4-14
4.2.1 Grupo 1: Magnitud y condiciones de descarga mensual	4-14
4.2.2 Grupo 2: Magnitud y duración de condiciones extremas	4-22
4.2.3 Grupo 3: Cronología de condiciones extremas de descarga	4-30
4.2.4 Grupo 4: Frecuencia y duración de los pulsos	4-31
4.2.5 Grupo 5: Tasa y frecuencia de los cambios hidrológicos	4-33
4.3 Metodología AVFD. Análisis de la Alteración del Régimen de Caudales y su Impacto en el río Sinú.	4-35
4.3.1 Análisis de las características generales de las curvas naturales de caudales y niveles a través del ciclo anual	4-37
4.3.2 Cambios en la recesión de los caudales y acción pulsátil de la operación de embalse	4-42
4.3.3 Estimación cambios la variabilidad de las magnitudes de los caudales	4-45
4.3.4 Estimación de los cambios en las frecuencias y duraciones de los eventos	4-46
4.3.5 Análisis de la variabilidad diaria histórica vs variabilidad horaria	4-50
<b>5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b>	<b>5-1</b>
5.1 Resultados	5-1
5.1.1 Metodología IHA Caso Urrá I	5-1
5.1.2 Propuesta Metodológica AVFD Caso Urrá I	5-3
5.2 Conclusiones	5-4

## **ANEXO 1 REPORTES DE PRENSA**

## **BIBLIOGRAFÍA**

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b>	Índices de alteración hidrológica. Metodología IHA.	2-6
<b>Tabla 3.1.</b>	Valores umbrales $Q_i$ y contadores de la serie hipotética	3-10
<b>Tabla 3.2.</b>	Valores umbrales $Q_i$ y contadores de la serie hipotética	3-11
<b>Tabla 3.3.</b>	Resultados serie baja variabilidad	3-12
<b>Tabla 3.4.</b>	Resultados serie alta variabilidad	3-12
<b>Tabla 3.5.</b>	Estaciones de registro diario.	3-15
<b>Tabla 4.1.</b>	Datos generales del proyecto multipropósito Urrá I	4-4
<b>Tabla 4.2.</b>	Resultados del análisis mensual con límite de RVA. Datos en $m^3/s$ .	4-21
<b>Tabla 4.3.</b>	Variabilidad histórica diaria vs variabilidad horaria. Datos en $m^3/s$	4-50

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b>	La forma de operar los embalses (Reglas de Operación)	2-2
<b>Figura 2.2.</b>	Aplicación de la metodología IHA en el río Roanoke en EEUU.	2-5
<b>Figura 3.1.</b>	Herramienta gráfica que proporciona la metodología al evaluador	3-2
<b>Figura 3.2.</b>	Selección de eventos de excedencia y no excedencia de caudales	3-8
<b>Figura 3.3.</b>	A. Gráfico comparativo de frecuencias relativas. B Gráfico comparativo de frecuencias absolutas. C Gráfico comparativo de duración máxima de eventos. D Gráfico comparativo de duración media de los eventos.	3-9
<b>Figura 3.4.</b>	Series hipotéticas de alta y baja variabilidad	3-10
<b>Figura 3.5.</b>	Frecuencia absoluta de eventos. Serie de alta y baja variabilidad	3-13
<b>Figura 3.6.</b>	Duración media de eventos. Serie de alta y baja variabilidad.	3-13
<b>Figura 3.7.</b>	Duración máxima de eventos. Serie de alta y baja variabilidad.	3-13
<b>Figura 3.8.</b>	Caudales horarios turbinados por Urrá I. Años 2001 y 2002.	3-15
<b>Figura 3.9.</b>	Curva de capacidad de Urrá I. Datos Históricos.	3-16
<b>Figura 4.1.</b>	Localización de la zona de estudio.	4-2
<b>Figura 4.2.</b>	Grupo 1. Caudales mensuales Enero.	4-15
<b>Figura 4.3.</b>	Grupo 1. Caudales mensuales Febrero.	4-15
<b>Figura 4.4.</b>	Grupo 1. Caudales mensuales Marzo.	4-16
<b>Figura 4.5.</b>	Grupo 1. Caudales mensuales Abril.	4-16
<b>Figura 4.6.</b>	Grupo 1. Caudales mensuales Mayo.	4-17
<b>Figura 4.7.</b>	Grupo 1. Caudales mensuales Junio.	4-17
<b>Figura 4.8.</b>	Grupo 1. Caudales mensuales Julio.	4-18
<b>Figura 4.9.</b>	Grupo 1. Caudales mensuales Agosto.	4-18
<b>Figura 4.10.</b>	Grupo 1. Caudales mensuales Septiembre.	4-19
<b>Figura 4.11.</b>	Grupo 1. Caudales mensuales Octubre.	4-19
<b>Figura 4.12.</b>	Grupo 1. Caudales mensuales Noviembre.	4-20
<b>Figura 4.13.</b>	Grupo 1. Caudales mensuales Diciembre.	4-20
<b>Figura 4.14.</b>	Alteración de los caudales medios mensuales multianuales encontrados en la metodología IHA.	4-21
<b>Figura 4.15.</b>	Caudales mínimos de 1 día de duración	4-23
<b>Figura 4.16.</b>	Caudales mínimos de 3 días de duración	4-24
<b>Figura 4.17.</b>	Caudales mínimos de 7 días de duración	4-24

<b>Figura 4.18.</b>	Caudales mínimos de 30 días de duración	4-25
<b>Figura 4.19.</b>	Caudales mínimos de 90 días de duración	4-25
<b>Figura 4.20.</b>	Caudales máximos de 1 día de duración	4-26
<b>Figura 4.21.</b>	Caudales máximos de 3 días de duración	4-27
<b>Figura 4.22.</b>	Caudales máximos de 7 días de duración	4-27
<b>Figura 4.23.</b>	Caudales máximos de 30 días de duración	4-28
<b>Figura 4.24.</b>	Caudales máximos de 90 días de duración	4-29
<b>Figura 4.25.</b>	Días de ausencia de caudal y comportamiento del Flujo Base.	4-30
<b>Figura 4.26.</b>	Fecha de caudal máximo	4-30
<b>Figura 4.27.</b>	Fecha de caudal mínimo	4-31
<b>Figura 4.28.</b>	Conteo de pulsos altos	4-31
<b>Figura 4.29.</b>	Duración de los pulsos altos	4-32
<b>Figura 4.30.</b>	Conteo de pulsos bajos	4-32
<b>Figura 4.31.</b>	Duración de pulsos bajos	4-33
<b>Figura 4.32.</b>	Tasa de caídas	4-33
<b>Figura 4.33.</b>	Tasa de ascensos	4-34
<b>Figura 4.34.</b>	Frecuencia de cambio de tendencia	4-34
<b>Figura 4.35.</b>	Serie de registros de caudal diario en la estación Angostura de Urrá.	4-36
<b>Figura 4.36.</b>	Serie histórica de caudales diarios. Angostura de Urrá vs. Serie de caudales descargados. Urrá I.	4-37
<b>Figura 4.37.</b>	Localización de estaciones de Caudal	4-39
<b>Figura 4.38.</b>	Ciclos anuales de caudales históricos en el río Sinú. a) Estación Angostura de Urrá. b) Estación Montería. c) Estación Sabana Nueva. d) Estación Cotoca Abajo.	4-40
<b>Figura 4.39.</b>	Ciclo anual. Izquierda: Río Sinú, Estación Angostura de Urrá. Derecha: Complejo Cenagoso del Bajo Sinú, Estación Momil.	4-41
<b>Figura 4.40.</b>	Curvas de duración diarias a nivel mensual	4-43
<b>Figura 4.41.</b>	Comparación de caudales en un periodo de invierno y otro de verano típicos. Estación Angostura de Urrá.	4-44
<b>Figura 4.42.</b>	Variación diaria de la serie de caudal en la estación Angostura de Urrá (1968-1995) y el sitio de descarga (1999-2005).	4-45
<b>Figura 4.43.</b>	Porcentaje de eventos que exceden un determinado caudal diario en la serie histórica y en la serie de descargas de Urrá I.	4-46
<b>Figura 4.44.</b>	Gráficos comparativos de duración máxima y media de los eventos de excedencia.	4-47
<b>Figura 4.45.</b>	Distribución de frecuencia de eventos que exceden un determinado caudal diario en un evento de verano y de invierno típicos.	4-47

<b>Figura 4.46.</b>	Histogramas de frecuencia absoluta de verano y de invierno.	4-48
<b>Figura 4.47.</b>	Gráficos comparativos de duración máxima y media de los eventos de excedencia en el verano histórico y reciente.	4-49
<b>Figura 4.48.</b>	Duración máxima (Izquierda) y media (Derecha) de los eventos de excedencia en el invierno histórico y reciente.	4-49
<b>Figura 4.49.</b>	Tasa de ascenso horaria histórica vs horaria Urrá I	4-50
<b>Figura 4.50.</b>	Tasa de descenso horaria histórica vs horaria Urrá I	4-51

# 1 INTRODUCCIÓN

La construcción de proyectos hidroeléctricos causa múltiples efectos ambientales locales y regionales. Generalmente estos efectos se atribuyen a la barrera biológica (embalse) que estos implementan aguas arriba de la presa. Casos como inundación de predios, reasentamientos, migración de peces y especies acuáticas, ciclos de vida de la fauna, entre otros son tenidos en cuenta en los planes de mitigación y manejo a los que son sometidos los proyectos hidroeléctricos.

Es común, en el medio colombiano, encontrar estudios de factibilidad de este tipo de proyectos que involucran censos e inventarios de los recursos encontrados aguas arriba del sitio de la presa, dando importancia a los efectos en las dinámicas socioeconómicas y bióticas. Los efectos ambientales generados por la operación (aguas abajo) solo son tenidos en cuenta como restricciones ambientales a la operación y entre estos se encuentran: caudal mínimo ecológico, descargas máximas de caudal, control de inundaciones, control de cuña salina y migración larvaria.

Las restricciones ambientales impuestas por el ministerio de medio ambiente, en la concesión de licencias de operación, en ocasiones se quedan cortas e involucran expresiones como “operar simulando las curvas naturales de caudal” donde no se acota, ni se establece bajo que escalas y condiciones se debe cumplir con estas restricciones.

Las tendencias ambientalistas, desarrolladas especialmente en Norte América, apuntan a evaluar estos efectos mediante metodologías que caractericen estos regímenes de caudal y su alteración. La metodología mas empleada es llamada IHA (Índices de Alteración Hidrológica) y esta es objeto de análisis en este trabajo.

Este trabajo expone las falencias que presenta la metodología IHA y la complementa mediante la implementación de una herramienta sencilla de análisis horario que está acorde con la resolución a la que trabaja el mercado o la bolsa de energía colombiana.

En primera instancia se aborda el tema de referente a la alteración hidrológica causada por la operación de embalses, seguidamente se revisa la evolución de las metodologías empleadas en la cuantificación de esta alteración y las medidas de manejo que se pueden emplear para estos casos como son la IHA y las derivadas de ella.

Posteriormente se analiza el procedimiento metodológico IHA, sus ventajas y desventajas, su aplicación en el contexto nacional y en el mercado energético, además se expone la metodología propuesta AVFD (Análisis de la variabilidad, frecuencia y duración) con la



incorporación de la herramienta horaria de análisis y se describe la información utilizada para la aplicación de estas metodologías en un caso práctico.

Después de presentar las metodologías, se analiza el caso de la operación del proyecto hidroeléctrico Urrá I mediante la aplicación de la metodología IHA y la metodología propuesta denominada AVFD.

Finalmente se presentan los resultados y conclusiones fundamentales encontradas por las dos metodologías implementadas para el caso Urrá I y unas conclusiones generales referentes a las metodologías utilizadas.

El alcance de este trabajo se enmarca fundamentalmente en los cambios al régimen hídrico causado por proyectos hidroeléctricos que regulen, en alguna medida, el caudal natural de una corriente y aunque, en algunos casos, se hable de los efectos sobre la fauna y la biota estas aseveraciones se encuentran fuera del alcance del mismo y corresponden a temas de otros estudios.

Como producto fundamental se espera que la complementación de la metodología IHA, mediante la herramienta de análisis horario de la metodología AVFD, se convierta en un primer paso en la consolidación de una metodología aplicable al medio colombiano, y que las ideas aquí descritas se empleen como control y en la formulación de estrategias de manejo ambiental implementadas por los entes reguladores ambientales y las corporaciones autónomas regionales.

A partir de esta propuesta metodológica, el ministerio del medio ambiente, puede mejorar la concepción ambiental de los proyectos hidroeléctricos y de impacto en corrientes que tengan la finalidad de generar energía en el mercado energético colombiano, además de fortalecer los mecanismos de control de los impactos ambientales generados por este tipo de proyectos energéticos.

## **2 MARCO TEORICO**

### **2.1 Construcción de Embalses, Operación e Impactos Ambientales**

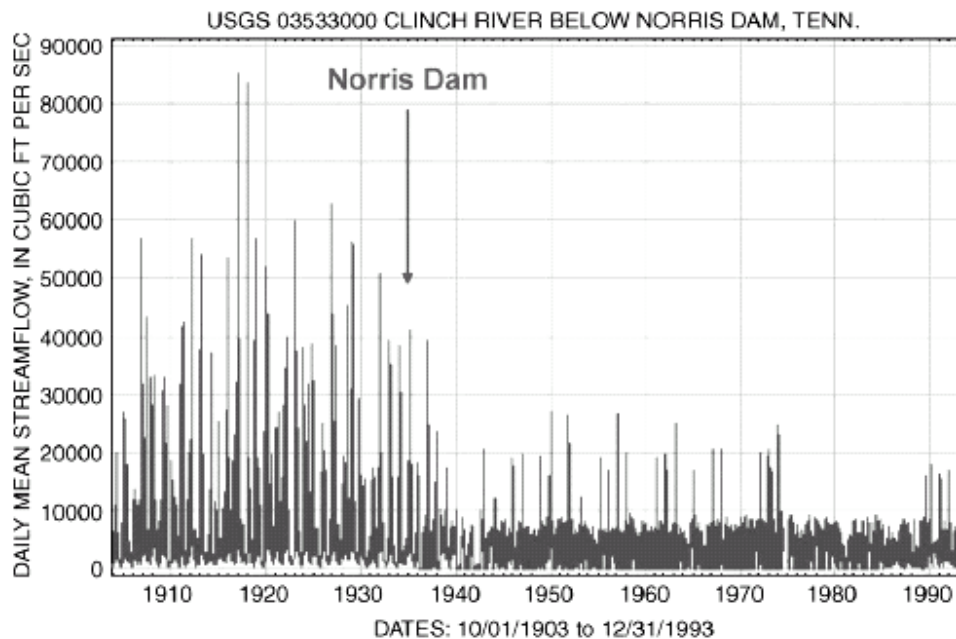
La construcción de presas y embalses con múltiples fines ha sido una constante solución a problemas de tipo social, como la obtención de energía eléctrica y el control de inundaciones. La alteración o bloqueo ambiental del ecosistema donde se ubica el embalse es el principal impacto ambiental generado por este tipo de proyectos. La inundación de zonas de alta montaña donde la producción hídrica es importante, es algo común en los embalses de Colombia. Todo esto conlleva a la implementación de políticas de manejo y mitigación de impactos ambientales aguas arriba de los embalses y sus espejos de agua con la finalidad de garantizar su vida útil y eficiencia; todo esto enmarcado en la relación costo-beneficio que no considera costos ambientales aguas abajo del mismo. Ver Figura 2.1

En este capítulo se consideran algunos aspectos relacionados con las consecuencias de la operación, generadas aguas abajo del sitio de descargas de caudal. Entre ellas se encuentra: La alteración del régimen hídrico, las alteraciones geomorfológicas, los cambios en la vegetación y ecosistemas riparios y las alteraciones en las dinámicas socio económicas.

### **2.2 Alteración del Régimen Hidrológico**

Uno de los principales efectos de los embalses es que transforman el régimen hídrico aguas abajo del mismo. Estos cambios inducidos por la necesidad de generación de energía en la mayoría de los casos, transforman los periodos estacionales de los ríos, sus caudales mínimos y máximos generando así un régimen regulado pos-embalse.

El régimen hídrico natural determina un conjunto de procesos geomorfológicos, propiedades y relaciones entre el río y el ambiente ripario manteniendo la diversidad y mejorando el hábitat de algunas especies. En algunos ríos, la alteración de este régimen ha provocado la extinción de comunidades de flora riparia nativa provocando una disminución en la biodiversidad.



**Figura 2.1.** La forma de operar los embalses (Reglas de Operación) tienen unas directrices u objetivos y dependiendo de estos se altera en mayor o menor medida un régimen de caudal natural.

Al reconocer estos efectos, las ONGs y agencias ambientales han promovido un movimiento en pro de remover cerca de 500 embalses en Norteamérica. Ahora la tendencia a establecer políticas de manejo de los embalses cobra importancia al convertirse en una opción mas viable para la restauración del cauce y de sus ambientes riparios. (Magilligan y Nislow, 2005).

Existen numerosas metodologías que persiguen el mismo objetivo, pero ninguna de ellas contempla un análisis de todo el rango de variabilidad que puede presentar el régimen hidrológico. Muchas de ellas son extremadamente simplistas como el “Método Montana” (1976) que se basa en los Caudales Medios Mensuales Multianuales (CMMA) del régimen para determinar criterios de manejo. Esta considera que es necesario un caudal mínimo instantáneo del 10% del CMMA para garantizar la supervivencia del ecosistema, el 30% del CMMA es recomendado para sostener en buena forma el hábitat, el 60-100% del CMMA para proveer un excelente hábitat y el 200% de CMMA recomendado para simular las crecientes instantáneas. Estas aproximaciones presentan limitaciones obvias, como no considerar los caudales extremos y el periodo estacional cuando estos se presentan.

Uno de los métodos más sofisticados y ampliamente aplicado es la Metodología del Flujo Incremental desarrollada por el Servicio de Pesca y Vida Salvaje de Estados Unidos en el

año de 1982. Esta metodología desarrolla un análisis hidráulico para evaluar las condiciones de los hábitat(s) respecto a las variaciones de nivel de flujo.

Una variante de la metodología de Flujo Incremental fue llamada “Evaluación del Hábitat de Rivera y Conceptos de Restauración” (RCHARC) aplicada al río Missouri en 1994. Su principal aporte fue que la distribución espacial y abundancia de ciertas profundidades asociadas a condiciones de velocidad de flujo pueden cambiar radicalmente la morfología del cauce, particularmente en ríos bajo la influencia antrópica como los embalses y las canalizaciones. En este estudio se relacionó la población riparia (de alta biodiversidad y aledaña a la corriente de agua) con condiciones de profundidad y velocidad de flujo, donde el objetivo fundamental era conservar el hábitat en condiciones naturales.

Hill, Platts & Beschta en 1991 sugirieron que el régimen de caudales se basa en 4 consideraciones fundamentales: flujo (base) para los peces, flujo a (banca llena) para el mantenimiento del canal, flujos de (inundación de llanura) para el hábitat ripario y flujos de (conservación del valle) que son flujos con un periodo de retorno mayor a 25 años. Estos autores describieron unas estrategias para la estimación de estos caudales que consisten en simulación de escenarios de manejo donde se suman o agregan cada uno de los flujos estimados. Aunque esta metodología se representa de una manera más integral las condiciones del régimen de caudales, no considera aspectos como la duración de eventos ni la variación estacional de la serie de registros diarios.

Al respecto Arthinton, et al. en 1991 propuso una “Metodología Holística” para fundamentar las recomendaciones de flujo en Australia esbozando las características fundamentales del régimen de caudales basados en registros diarios. En esta, cuatro atributos del régimen son progresivamente sumados para crear un régimen recomendado o modificado. En esta se caracterizan: caudales bajos, primera gran inundación de invierno, inundaciones medias y grandes inundaciones. Todos estos estimados estadísticamente, a partir de registros diarios de caudal, basados en un determinado percentil mensual de excedencia.

En resumen, para los dirigentes y decisores de los recursos hídricos se hace importante considerar los siguientes aspectos:

Magnitud, frecuencia, duración y estacionalidad de los eventos; los resultados sobre los ecosistemas dependen de estos aspectos de la hidrología.

Las decisiones de manejo se fundamentan, en ocasiones, en características que no son representativas para los procesos ecológicos.

Diversas decisiones de manejo se hacen considerando solo especies clave presentes en la zona, números limitados de individuos y sus requerimientos de hábitat causando efectos indeseables sobre otras especies.

Las relaciones existentes entre las condiciones hidrológicas y sus efectos en la biota se llevan a cabo a escalas espacio temporales que no son consideradas en las estrategias de manejo.

Las consideraciones, resultados y estrategias de manejo encontradas para un río no son aplicables a otras corrientes debido a que las condiciones climáticas y de localización geográfica son muy distintas.

### **2.2.1 METODOLOGÍA IHA**

El problema de la alteración del régimen hídrico ha sido abordado por varios autores últimamente, entre ellos se destaca el trabajo de Richter B. D., de 1996 donde se establece una metodología llamada "IHA" que consta en el cálculo y análisis de 33 índices de alteración hidrológica aguas abajo de los embalses. Esta metodología se ha consolidado en el medio al registrar su aplicación en cerca de 80 casos alrededor del mundo. Estas aplicaciones se clasifican en cuatro grupos principales:

**Investigación Hidrológica:** El uso de la metodología y el software "IHA" en la evaluación de cambios en las condiciones hidrológicas, incluyendo cambios causados por actividades de manejo antrópico (embalses, diversiones acuáticas y bombeos de agua subterránea), cambio climático, cambios en el uso de la tierra, etc.

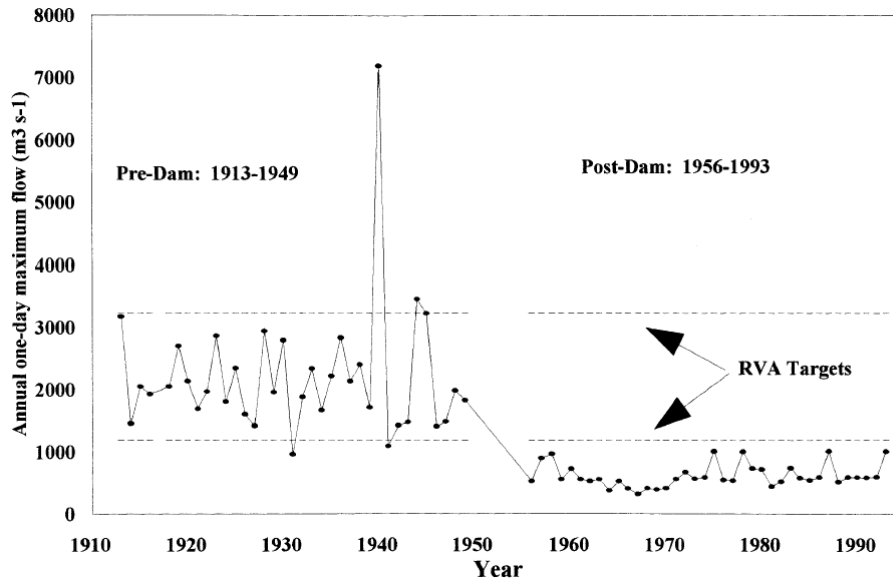
**Investigación Ecológica:** Su uso en la evaluación de conexiones entre las condiciones hidrológicas y el tipo de respuesta ecológica. En este se incluyen estudios específicos de influencias sobre algunas especies, transporte de sedimentos y distribución de la salinidad.

**Formulación de recomendaciones de caudales ambientales:** Este incluye trabajos donde se usó del software asociado a la metodología "IHA" que incluye parámetros base para el establecimiento de rangos de variación y monitoreo de ciertas variables ambientales.

**Otros:** Trabajos que no se asocian a las categorías anteriormente descritas.

Esta metodología se presenta como una caracterización estadística de la variabilidad temporal en el régimen hidrológico usando atributos ecológicos significativos

estadísticamente que permite hacer un análisis comparativo de los dos estados pre y pos embalse. Ver Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Aplicación de la metodología IHA en el río Roanoke en Carolina de Norte EEUU. Es apreciable el efecto regulador sobre las crecientes de un día de duración y el comportamiento atípico después de la construcción del embalse en 1956.

Los índices que se consideran en esta metodología se expresan en la Tabla 2.1, estos se agrupan en 5 clases. Como se puede apreciar, en la tabla se refieren algunas influencias de este tipo de índices sobre los ecosistemas, en este caso, riparios.

Adicionalmente esta metodología incorpora un método para determinar o implementar objetivos de manejo de descargas de caudal llamado “RVA” (Range of Variability Approach) y un método de determinación de las componentes de los caudales ambientales en la serie de registros llamado “EFC” (Environmental Flow Component).

## 2.2.2 METODOLOGÍA RVA (Range of Variability Approach)

Esta es una metodología basada en el comportamiento de los índices IHA de alteración hidrológica, enfocada a establecer unos objetivos de planeación y manejo de recursos hídricos, especialmente en ríos de flujo regulado donde es un objetivo fundamental la conservación de la biodiversidad acuática nativa.

**Tabla 2.1.** Índices de alteración hidrológica. Metodología IHA. Tomado de Richter B. D., 1996.

Grupo general	Características	Parámetros usados en el IHA	Influencias en los ecosistemas
1. Condiciones de descarga mensual	Magnitud y tiempo	Descarga media mensual para cada mes (I2)	Disponibilidad de hábitat para organismos acuáticos
			Disponibilidad de suelo para plantas
			Disponibilidad de agua para animales terrestres
			Disponibilidad de comida para mamíferos
			Fabilidad de los suministros de agua para los animales terrestres
			El acceso de depredadores a los sitios de anidación
			Influencia de la temperatura del agua, niveles de oxígeno y la fotosíntesis en la columna de agua
			Equilibrio de la competencia, estrés y tolerancia a los organismos
			Creación de sitios para colonización de plantas
			Estructuración de los ecosistemas acuáticos por los factores abióticos versus bióticos
			Estructuración de la morfología de los canales del río y las condiciones del hábitat físico
2. Magnitud y duración de las condiciones extremas anuales de descarga	Magnitud y duración	1 Máximo anual de 1 día de duración	El estrés de la humedad del suelo en las plantas
		2 Mínimo anual de 1 día de duración	Deshidratación en animales
		3 Máximo anual de 3 días de duración	Estrés anaerobio en plantas
		4 Mínimo anual de 3 día de duración	Volumen de intercambios de nutrientes entre los ríos y las llanuras aluviales
		5 Máximo anual de 7 días de duración	Duración de las condiciones estresantes, como la baja de oxígeno y concentración de químicos en los ambientes acuáticos
		6 Mínimo anual de 7 días de duración	Distribución de las comunidades vegetales en los lagos, estuarios, las llanuras aluviales
		7 Máximo anual de 30 días de duración	
		8 Mínimo anual de 30 días de duración	
		9 Máximo anual de 90 días de duración	
		10 Mínimo anual de 90 días de duración	
3. Tiempo de las condiciones extremas de descargas anuales	Tiempo	11 Número de días sin flujo	Duración de las corrientes de alta para la eliminación de residuos, la aireación de las zonas de desove carnos sedimentos en el canal
		12 Flujo mínimo de 7 días de duración / flujo medio anual	
4. Frecuencia y duración de flujos altos y bajos	Magnitud, frecuencia y duración	1 Fecha acumulada de descarga mínima anual de 1 día de duración	Compatibilidad con los ciclos de vida de los organismos
		2 Fecha acumulada de descarga máxima anual de 1 día de duración	Predictibilidad / entubilidad de estíres de los organismos
			El acceso a los hábitats especiales durante la reproducción o para evitar la depredación
			Claves para el desove de peces migratorios
5. Tasa / Frecuencia de cambios en la hidrografía	Frecuencia y tasa de cambio	1 Número de flujos altos por año	Evolución de la historia de vida de estrategias, mecanismos de conducta
		2 Número de flujos bajos por año	Frecuencia y magnitud de la humedad del suelo para las plantas de estíres
		3 duración media de flujos altos	Frecuencia y duración del estrés para las plantas anaeróbicas
		4 Duración media de flujos bajos	Disponibilidad de la llanura de inundación hábitats para los organismos acuáticos
			Intercambio de nutrientes y materia orgánica entre la llanura de inundación y el río

Planteada en el documento “How much water” por Richter, B. D., 1997 esta contempla diversos aspectos, ambientalmente fundamentales, para la conservación de los hábitat(s) ecológicos dependientes del régimen hídrico de un curso de agua.

La metodología de manejo, basada en RVA, está orientada a establecer ciertos umbrales o restricciones de manejo y operación, en caso de flujos regulados, donde se garantiza que los índices representativos del régimen hídrico natural se conservan. Esta consta de seis pasos fundamentales:

1. Caracterización del régimen hídrico natural. Mediante la metodología IHA, anteriormente descrita, se establecen 33 índices o parámetros significativos del régimen.
2. Determinación de las restricciones para cada uno de los parámetros estimados RVA.
3. Elaboración de unas líneas guías de manejo basadas en los resultados del RVA.
4. Cuando sea establecido un sistema de manejo se debe implementar un sistema de monitoreo de efectos ecológicos con retroalimentación.
5. Al terminar cada año se deben calcular los 33 índices IHA y se evalúa el cumplimiento de estos según el RVA.
6. Repetir los pasos 2-5 e incorporar nuevas restricciones de manejo correspondientes con los monitoreos del hábitat y el cumplimiento del RVA.

En la determinación de los límites o rangos de variación se emplean criterios estadísticos como medidas de dispersión de los datos diarios. Comúnmente se emplean límites considerando la desviación estándar encontrada en las series naturales, así los límites se determinarán como el valor medio encontrado sumado o restado a una desviación estándar.

Además, esta metodología aporta unas medidas de alteración hidrológica para cada índice evaluado por la metodología IHA, antes expuesta, que consta de tres rangos de acumulación de valores determinados estadísticamente en percentiles 33, 66 y 100; y en tres porciones de desviaciones estándar alrededor de la media, en el caso del análisis paramétrico. Estos se calculan mediante la siguiente relación:

$$low, mid, high\_HA = \frac{(frecuencia\_observada - frecuencia\_esperada)}{frecuencia\_esperada}$$



En cada caso los valores calculados se encuentran entre  $-1$  y  $\infty$ , y estos indican aumento en la frecuencia de los datos cuando el valor es mayor a cero y disminución de los mismos cuando la frecuencia disminuye.

En la formulación de las estrategias de manejo es importante establecer como mecanismos de retroalimentación, restricciones de tipo técnico y de demanda de recursos diferentes a las ambientales, como suplir la demanda de consumo humano donde sea necesario.

### 2.2.3 METODOLOGIA EFC (Environmental Flow Component)

La metodología IHA permite el cálculo de parámetros para 5 tipos de componentes de los caudales ambientales:

- Caudales Bajos (Low Flows)
- Caudales Muy Bajos (Extreme Low Flows)
- Pulsos de Alto Caudal (High-Flow Pulses)
- Inundaciones Bajas (Small Floods)
- Grandes Inundaciones (Large Floods)

Esta categorización fue realizada a partir de investigaciones ecológicas que derivaron en la conclusión de que la hidrógrafa de los ríos puede ser dividida en un conjunto de patrones repetitivos que son ecológicamente relevantes. En esta se encuentra todo el espectro de condiciones de flujo representadas por estos 5 tipos de eventos que deberían conservarse para mantener en orden la integridad ecológica de los ecosistemas riparios.

**Caudales Bajos (Low Flows):** Esta es la condición dominante en la mayoría de los ríos. Se asocia con el nivel de flujo base característico después de presentarse un evento de lluvia. La variación estacional de los niveles asociados a este tipo de caudales impone una restricción fundamental a las comunidades acuáticas de rivera porque determina la cantidad de hábitat disponible en el año (condiciones favorables para el desarrollo de especies). Este tiene una fuerte influencia en la diversidad y número de organismos que pueden vivir en el ambiente ripario.

**Caudales Muy Bajos (Extreme Low Flows):** Durante los periodos secos los ríos pueden presentar niveles demasiado bajos que generan estrés en muchas especies, pero pueden

proveer condiciones necesarias para otras especies. Las características químicas del agua, temperatura y oxígeno disuelto disponible pueden convertirse en factores altamente críticos para muchos organismos, hasta el punto de crear condiciones que les causa la muerte. Por otro lado, este tipo de caudales podrían concentrar presas acuáticas para algunas especies o podrían ser necesarias para secar áreas de planicies de inundación y así facilitar que ciertas especies de plantas se regeneren.

**Pulsos de Alto Caudal (High-Flow Pulses):** Durante las tormentas de corto periodo, el río sube sus niveles. Estos incluyen un incremento de caudales que generalmente no producen inundaciones o no rebasan las bancas de las riveras. Estos pulsos son importantes e interrumpen los periodos de Caudales Bajos, aun más, cuando una pequeña sequía puede generar condiciones de alta temperatura del agua o bajas concentraciones de oxígeno, típicas de periodos de caudales muy bajos, que generan alimentos orgánicos que navegan por el río. Además estos caudales generan acceso a áreas de alimentación de especies aguas abajo.

**Inundaciones Bajas (Small Floods):** Durante las inundaciones, los peces y otros organismos móviles son capaces de migrar aguas arriba y aguas abajo e introducirse en las planicies de inundación y los humedales inundados buscando nuevos hábitat(s) tales como canales secundarios, remansos, aguas estancadas, ciénagas, atolladeros y áreas superficialmente anegadas. Estas áreas, usualmente inaccesibles, proveen a los ecosistemas de fuentes de alimento. Estas áreas anegadas superficialmente comúnmente son mas calientes que el canal principal y llenas de nutrientes e insectos que incentivan el crecimiento de la fauna acuática. Estos caudales incluyen todas las crecientes que sobre pasan el nivel de desborde de las bancas pero no incluyen los eventos mas extremos que son menos frecuentes.

**Grandes Inundaciones (Large Floods):** Este tipo de eventos reorganizan la estructura física y biológica del río y su llanura de inundación. Pueden arrastrar muchos tipos de microorganismos que en ocasiones pueden remover especies, pero en otras, crean condiciones competitivas para algunas especies. Pueden ser importantes para la creación de hábitat(s) clave como madre viejas y humedales en la planicie de inundación.

La determinación de cada componente ambiental esta dada por condiciones estadísticas presentadas en la serie de registros. Los Pulsos de Alto Caudal son los que están ubicados por encima del 75° percentil, los eventos que se encuentran por debajo del 75° percentil están clasificados como Caudales Bajos. Las Inundaciones Bajas y Grandes están asociadas a eventos con un periodo de retorno de 2 años y 10 años

respectivamente. Los eventos clasificados como Caudales muy Bajos corresponden a eventos que no sobrepasan el 10° percentil. Richter et al.,1996.

Magilligan y Nislow estudiaron 21 embalses distribuidos en Norteamérica, mediante la metodología de IHA de (Richter et al.,1996) desarrollada y aprobada por Nature Conservancy, encontrando una serie de efectos a saber:

### ***Magnitud de eventos extremos***

Los embalses cumplen fielmente los propósitos para los cuales fueron diseñados causando un cambio dramático en la magnitud de los eventos máximos de duración diaria con un descenso de 55% para 20 casos de los 21 que se estudiaron. Para eventos máximos en periodos semanales (7 días) el descenso en la duración fue de por lo menos el 39% además de encontrarse disminuciones en la duración de eventos máximos estacionales (90 días).

Respecto a los eventos o caudales mínimos se encontró una tendencia diferente. Estos se presentaron aumento de magnitud con mayor frecuencia resaltando eventos de gran duración. La duración de estos presentó una tendencia significativa al incremento. La relación más significativa encontrada fue en la escala mensual donde el incremento, en su magnitud, fue del 86% en promedio.

### ***Cambios en la variabilidad de la hidrografía***

Este tema abarca los cambios en la forma de la serie de descargas de los embalses. Al respecto se encontró que la metodología IHA es apropiada para captar los cambios de este tipo, pero solo a nivel diario y a escalas temporales más gruesas. Los cambios instantáneos en las descargas no son objeto de análisis para esta metodología.

Se encontró un aumento de 55% en el número de inversiones de caudal (cambio de tendencia ascenso-descenso y viceversa) asociado a altos índices de variabilidad de la precipitación y la capacidad de almacenamiento del embalse. Además se encontró un cambio significativo en la forma de los picos de caudal a causa de los cambios en las tasas de ascenso. El autor hace claridad acerca de la respuesta pulsátil y anota que es un factor crítico para las funciones riparias. “Los cambios en la frecuencia y duración de los estados de descarga pueden desorganizar los ecosistemas terrestres y acuáticos”. Al respecto se encontró un aumento en la frecuencia de pulsos altos y una disminución en su duración.

### ***Cambios en el tiempo de los flujos de caudal***

Este tema se refiere a las duraciones de los eventos de flujo mínimo y máximo en el ciclo anual o régimen de caudal. Aquí se tiene en cuenta la duración y cuando se presentan estos eventos. Se encontró que en Norteamérica en general los embalses descargan sostenidamente un flujo mínimo al terminar el verano y al comenzar la época de lluvias y que la duración de estos eventos varía entre los 52 y los 175 días. Para la época donde realizan altas descargas la duración fue, en promedio, de 30 días.

## **2.3 Alteraciones Geomorfológicas**

Las alteraciones geomorfológicas aparecen como consecuencia de la alteración del régimen hídrico. Este hecho ha sido anotado por diversos autores norteamericanos después del periodo 1935-1975 donde se construyeron la mayoría de los grandes embalse norteamericanos. Finalizando la década de 1960 se concluyeron 44 de estos embalses en Norteamérica y los cambios en el régimen hídrico fueron obvios, a pesar de las políticas de manejo implementadas los regimenes fueron totalmente regulados. (Graf, 2006).

El número de publicaciones pertinentes al tema es numeroso y resulta complicado hacer una revisión exhaustiva de los mismos. En términos generales se concluye que los embalses regulan el régimen de caudal reduciendo las crecientes, los caudales mínimos se ven aumentados y se alteran los tiempos o duraciones de los picos de máximos y de mínimos caudales. (Graf, 2006).

W. L. Graf, explica los efectos de los embalses sobre los cambios en las cargas de sedimentos y sus efectos. Anota que múltiples investigadores y modeladores de embalses han llegado a la misma conclusión “Los embalses degradan el canal aguas debajo de la presa debido a su papel como trampa de sedimentos”. El agua descargada por el embalse está relativamente libre de sedimentos y con alta capacidad de transporte, esta degrada el lecho del canal cambiando su distribución granulométrica en ocasiones, a lo largo de cientos de kilómetros. Como una segunda consecuencia se encontró que las playas naturales de las riveras eran erodadas y que la corriente perdía su capacidad de regenerarlas debido al régimen de caudal regulado y a la ausencia de crecientes naturales. Se encontró también que existe una tendencia a la estabilización del cauce y a la acumulación de escombros dado que la corriente regulada no tiene la capacidad de transportarlos. La ultima generación de investigadores ha encontrado que además de los cambios anteriormente anotados, que las corrientes reguladas por embalses cambian la

forma de las riveras y que la ausencia de los grandes caudales anuales causa una disminución en las tasas de migración lateral de las riveras además de estabilizar superficies anteriormente activas causando un fenómeno de encogimiento o estrechamiento del canal. Todo esto finalmente se traduce en la transformación de ambientes riparios a superficies inactivas.

## **2.4 Cambios en la Vegetación y Ecosistemas Riparios**

Los cambios en el régimen hidrológico indudablemente repercuten en desajustes ecológicos. La capacidad de adaptación de los ecosistemas depende, en gran medida, de la cantidad y la disponibilidad de recursos naturales. Los embalses al alterar la magnitud, frecuencia y duración de caudales aumentan o disminuyen los recursos para ciertas especies riparias y solo aquellas que posean mayor capacidad de adaptación podrán disponer del nuevo hábitat generado aguas abajo de la presa.

Crear condiciones extremas de larga duración, genera un estado de estrés ambiental, donde como anteriormente se anotó, solo algunas especies sobreviven. Como consecuencia inmediata se disminuye la biodiversidad de estos ambientes riparios. (Magilligan y Nislow, 2005).

El desorden es un componente esencial para el sostenimiento de los ecosistemas. Alteraciones en la magnitud y frecuencia de los caudales disminuyen la heterogenicidad del lecho del canal, disminuyen la capacidad de renovación y navegación de la biomasa importantes para la alimentación de las comunidades ícticas. Los macro invertebrados y peces béticos responden rápidamente a los cambios hidrogeomórficos y usualmente son buenos indicadores de degradación ambiental. Estas poblaciones requieren un poco de disturbios para mantener su diversidad. Especies Clave como estas, se ven reducidas cuando se disminuyen los altos flujos de agua y donde se ha cambiado el régimen sedimentológico del lecho del canal circunstancias creadas comúnmente aguas abajo del embalse. La forma mas obvia de degradación ocurre cuando componentes críticos del hábitat, tales como gravas y superficies aptas para el desove son cubiertas luego por material fino que además disminuye la cantidad de oxígeno disuelto deteriorando la calidad del hábitat de los peces, macro invertebrados y algas.

## 2.5 Alteraciones en las Dinámicas Socio Económicas

La construcción de embalses y de proyectos hidroeléctricos crea una amplia gama de consecuencias ambientales y sociales que van más allá de lo calculado inicialmente. Los investigadores son constantemente desafiados a establecer los factores o las interrelaciones que determinan las dinámicas en estos ambientes y es de uso común que los planificadores basen sus decisiones sobre los escenarios futuros de mayor probabilidad estadística.

Una consecuencia importante de la operación de embalses, es la eliminación de los beneficios aportados por las inundaciones. Esto genera consecuencias sobre las dinámicas sociales alterando sistemas de producción local como cultivos secanos además de la producción ganadera y pesquera. (Maingi, 2002).

En países que basan su economía en la producción agrícola y ganadera, la alteración de los ciclos de inundación trae consecuencias notables sobre la comunidad y la economía local. Estos casos se encuentran bien documentados en las cuencas del río Tana en Kenia y en el río Mekong en China. En estas cuencas, se asienta la mayor parte de la población de estos países y el río, históricamente, ha sido la principal fuente de ingresos de estos habitantes.

El caso de las planicies de inundación en Zambia, en la cuenca del río Kafue, es otro ejemplo de los efectos del régimen hídrico regulado sobre las dinámicas económicas, en donde la regulación ejercida por dos embalses provocó una drástica alteración del ciclo natural de inundación, con una pérdida de la elasticidad ecológica del sistema (capacidad de soportar y de recuperarse de periodos de estrés ecológicos), que creó las condiciones necesarias para la reproducción de especies invasoras de vegetación lo cual repercutió en disminución en la producción agrícola y ganadera de la zona. (Mumba & Thompson, 2005).

La alteración de los procesos de generación de bienes y servicios del hábitat es un factor desencadenante de la problemática asociada a los proyectos hidroeléctricos. Los estudios de impacto ambiental previos a la construcción de estos proyectos comúnmente se quedan cortos al evaluar las consecuencias económicas generadas en las dinámicas aguas abajo de los mismos al cabo de 10 años de operación.

En Colombia los efectos en las dinámicas sociales no se han dimensionado en su totalidad, se ha fortalecido la política ambiental y el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) ha aumentado la calidad de los estudios para realizar

concesiones de aguas y de emisión de licencias ambientales. Aun así, la determinación de los efectos ambientales y la alteración de las dinámicas es un tema que debe ser desarrollado.

Valderrama ha estudiado las dinámicas pesqueras en Colombia y las considera un factor determinante en el desarrollo de las regiones y de los ecosistemas del país. (Valderrama, 1984). En su trabajo declara a Urrá I como uno de los proyectos con mayores efectos sobre las dinámicas ícticas.

La Universidad Nacional de Colombia en sus estudios de la Dinámica Hídrica del Complejo Lagunar del Bajo Sinú (UNAL, 2005) y en la formulación del Plan de Manejo Ambiental del Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (UNAL, 2008) han determinado que uno de los factores determinantes en las dinámicas sociales de este complejo de ciénagas es la operación del embalse Urrá I. Factores como la ampliación de la frontera agrícola, la sustitución de cultivos, la disminución de peces disponibles para la pesca, la pérdida de área anegable del complejo solo son unos de los efectos de la operación del embalse Urrá I. Estos estudios han servido como base para la implementación de estudios económicos desarrollados por El Banco de la República de Colombia (Salazar, 2008) recientemente, los cuales han validado la situación encontrada en la zona por la Universidad Nacional.

El caso de Urrá I ha sido uno de los que ha generado mayor controversia en el país, y la comunidad y la prensa escrita ha dado a conocer los efectos que percibe la comunidad. Entre estos se tienen, disminución de las fuentes de empleo derivadas de la extracción de arena y de peces del río y ciénagas, la disminución de las ciénagas y del recurso hídrico, la interacción de las ciénagas y los factores de alteración pública (actores armados), además de los beneficios derivados de la generación de energía y del alivio de las crecientes naturales. En el anexo 1 de este trabajo se exponen algunos de estos reportes de prensa.

## **2.6 Problemas Ambientales y Embalses en Colombia**

En Colombia los embalses han sido altamente cuestionados desde su concepción o etapa de diseño. Se reportan problemas de diversos tipos (Márquez, 2001):

- Corrosión y abrasión.
- Sedimentación.

- Mala calidad de aguas debidas a eutroficación.
- Mortandad masiva de peces.
- Efectos sobre pesquerías y peces migratorios.
- Efectos sobre la salud pública.
- Otros problemas ambientales.

Los problemas de corrosión y abrasión se refieren a efectos del medio sobre las obras donde el desgaste de los equipos de generación son los más graves y son causados por la mala calidad de las aguas. En Colombia se reportó el caso del embalse de Chivor como el de mayor magnitud.

El problema de la sedimentación es el de mayor frecuencia en Colombia. Por malos manejos ambientales de las cuencas productoras de flujo superficial se desencadenan estos problemas de sedimentación, que se traducen en la perdida de la vida útil del proyecto o del embalse. El caso de mayor gravedad ha sido el del embalse de Anchicayá en el cual se redujo su vida útil de 50 años a solo 10 años.

La eutroficación es otro problema reportado en algunos de los embalses colombianos. Este se debe principalmente a la acumulación de materia orgánica que, en descomposición, consume las reservas de oxigeno disuelto y favorece la producción de gases tóxicos. Los casos más graves en Colombia han sido en los embalses de Guatapé, Prado, Betania y Muña.

El grado de deterioro de la calidad del agua puede llevar a problemas de mortandad masiva de peces y de otros organismos en los embalses. En el embalse de Prado se identificaron fenómenos de circulación de vientos que afectó las dinámicas térmicas del embalse que son perjudiciales para las comunidades de peces. Existe evidencia de fenómenos de competencia por el oxigeno entre las plantas que consumen en altas tasas el oxigeno disuelto y deterioran la calidad del agua en las ciénagas del bajo Magdalena, esta competencia se presenta también en los embalses. Las actividades productivas aguas arriba del embalse también pueden deteriorar la calidad del agua, este es el caso de los abonos, alimentos y plaguicidas.

Los efectos sobre el negocio de la pesquería y de la alteración de las dinamicas migratorias de los peces se han validado en otros países y en Colombia. (Valderrama,



1985). Los proyectos de los cuales se espera mayor incidencia de este efecto son los de Urrá I, Ituango y Cañafisto, estos dos últimos aun no construidos.

La proliferación de zancudos es quizá, el mayor efecto de incidencia en la salud pública que generan los embalses en Colombia, no se han registrado problemas relacionados con trematodos que se han reportado en otros países.

Aunque no se reportan efectos ambientales severos o catástrofes ambientales en Colombia, se debe anotar que estos problemas se hubiesen podido prever con unos estudios de impacto ambiental de mejor calidad donde se involucraran conocimientos específicos de cada caso y una visión crítica para extrapolar la información proveniente de otros países del mundo (Márquez, 2001).

## 3 ANÁLISIS METODOLÓGICO

En este capítulo se hace una descripción de la metodología IHA que complementa lo que ya se revisó en el Marco Teórico de este trabajo, además se exponen las desventajas y ventajas de su aplicación. También se expone la propuesta metodológica AVFD objeto de este trabajo y la información disponible para su aplicación.

### 3.1 Metodología IHA

Aquí se realiza una revisión conceptual de la metodología IHA propuesta por Richter (1996), evaluar los parámetros de análisis, su aplicabilidad, sus beneficios y desventajas proyectadas a su aplicación en el medio Colombiano e implementación como herramienta de control en planes de manejo de sistemas integrados ambientales.

Como se dijo anteriormente la metodología IHA se basa en el cálculo de 33 índices de alteración, agrupados en 5 grupos de análisis. Adicionalmente se calculan unos parámetros estadísticos de alteración llamados RVA. Estos, en conjunto, proporcionan al evaluador una herramienta gráfica que permite establecer valores de alteración hidrológica para cada uno de los índices. Además, el evaluador cuenta con los datos de cálculo en cada caso mediante las tablas de proceso.

#### *Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA)-Etapas*

Esta metodología se basa en el cálculo de una serie de indicadores que son estimativos y base para el análisis de las alteraciones hidrológicas causadas a las corrientes de agua, principalmente, causadas por acciones antrópicas.

En primera instancia, se debe tener una serie hidrológica relevante biológicamente, que refleje la variación intra-anual del régimen hídrico de la corriente en análisis, de la cual se pueda realizar un análisis comparativo del periodo pre y pos alteración.(Richter,1996).

La metodología, básicamente, consiste en el cálculo de 33 índices, que se encuentran clasificados en 5 grupos. Ver tabla 2.1. En la aplicación de la metodología, el autor establece 4 etapas:

1. Definir claramente los periodos PRE y POS alteración. En esta etapa se debe definir claramente la serie de datos a utilizar.

2. Calcular los atributos hidrológicos para cada uno de los 33 índices de alteración de la metodología para cada año y en cada periodo de tiempo definido en la etapa 1.
3. Calcular los valores estadísticos inter-anales. En esta etapa se calcula la tendencia central y la dispersión para los 33 índices de alteración, basados en los valores calculados en la etapa 2 y como producto se obtienen 66 valores estadísticos para cada serie en análisis.
4. Calculo de los valores IHA. Mediante la comparación de los 66 estadísticos calculados en la etapa 3 para la serie PRE y POS impacto. Aquí se presenta esta alteración en términos de porcentaje, relacionando el periodo POS impacto relativo a la condición inicial o PRE impacto.

La información de entrada consiste en una serie de caudales, niveles o cabezas medias diarias. Utilizar datos mayores, a la resolución diaria, presenta limitaciones en la detección de las alteraciones hidrológicas. (Richter, 1996).

El objetivo básico de esta metodología es la caracterización de la variación temporal de las condiciones hidrológicas usando índices de relevancia biológica, sensibles a la influencia de acciones antrópicas tales como operación de embalses, bombeos de agua subterránea y distritos de riego. Muchos de estos índices pueden ser usados para caracterizar el hábitat físico. (Soutwood, 1977, 1988; Poff & Ward, 1990; Townsend & Hildraw, 1994).

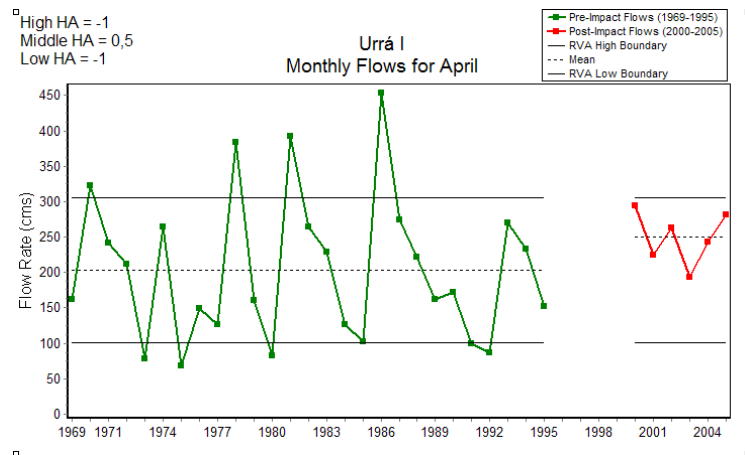


Figura 3.1. Herramienta gráfica que proporciona la metodología al evaluador

Esta metodología permite al evaluador y analista realizar comparaciones numéricas y gráficas de estos índices calculados a partir de las series analizadas, lo cual garantiza mayor poder de interpretación de los resultados obtenidos. Ver Figura 3.1.

### 3.1.1 Beneficios

Esta metodología se ha desarrollado a partir de la evolución de otras metodologías que buscaban el mismo objetivo. Richter, ha buscado incorporar el mayor número de índices de alteración hidrológica para que la metodología sea integral y aplicable en casi todos los casos.

El grupo 1 de índices involucra una evaluación al ciclo anual de régimen de caudales mes a mes y da un vistazo global al ciclo anual. El grupo 2 de índices, evalúa las condiciones extremas de descarga máximas y mínimas, su magnitud y duración. El grupo 3 de índices, evalúa el tiempo en que se dan estos eventos extremos. El grupo 4 de índices, evalúa los pulsos en su magnitud frecuencia y duración. El grupo 5 de índices, evalúa las tasas de cambio en el régimen y su frecuencia.

Todos estos índices abarcan el sentido global del régimen de caudales. Agregar algún otro grupo de índices sería recomendable solo en casos particulares de aplicación.

Richter ha logrado relacionar estos índices con sus posibles repercusiones ambientales sobre la biota existente aguas abajo del embalse y estas sirven como información de referencia en casos donde no se tiene registros o censos de los recursos bióticos existentes en los ecosistemas alterados o donde no se conocen las dinámicas internas de circulación de estos recursos naturales.

Las relaciones encontradas por el autor, entre los índices IHA y sus posibles repercusiones ambientales deben ser aplicadas con sumo respeto y se deben tener presentes las hipótesis de aplicación, lo cual deja en entredicho estas relaciones en el medio Colombiano.

El valor agregado de mayor importancia de esta metodología es, sin duda alguna, el establecimiento de los límites RVA que puede ser una herramienta de manejo Ambiental importante.

Al existir una aplicación computacional ya establecida IHA versión 7, se facilita la aplicación de esta metodología. Esta garantiza que en cualquier parte del mundo, donde sea aplicada, se parte de los mismos principios y parámetros de análisis.

### 3.1.2 Falencias

La metodología IHA se ha consolidado en el medio mediante su continua aplicación en distintas corrientes en el mundo y ha fortalecido sus conceptos con el tiempo y como se ha recalado, el conjunto de índices que involucra evidencia las principales alteraciones al régimen de caudal que causan los embalses y su operación. Aun así, existen casos donde la metodología no es capaz de percibir alteraciones hidrológicas causadas a escalas de tiempo menores que las diarias.

La generación de energía es una actividad humana que involucra importantes recursos económicos para la sociedad y, no menos importantes, recursos naturales de los ecosistemas. Como la energía es un intangible, no almacenable, los sistemas de generación eléctrica se regulan según la demanda presentada. En el caso Colombiano, la generación y comercialización de energía se rige por las leyes 142 y 143 del año 1994. Estas leyes regulan lo referente a la generación y comercialización de un mercado energético que responde fielmente a la relación oferta demanda y que se encarga de proporcionar la energía necesaria a la sociedad en función de la demanda a intervalos de tiempo horarios.

Así, los entes generadores de energía están sujetos a que la demanda aumente para generar más energía. El beneficio económico de los generadores de energía aumenta en función de la demanda energética y para ellos resulta inconveniente descargar caudales altos en condiciones de baja demanda energética. Estos hechos provocan descargas pulsátiles en todos los embalses de Colombia durante el día y la noche, generalmente estas altas descargas se asocian a los picos de demanda diaria. Todos estos factores van en contra de las demandas ambientales presentadas a distintas escalas de tiempo.

Al no considerar variaciones a la escala horaria, la metodología no proporciona herramientas para reglamentar la operación horaria de los embalses y sus descargas en Colombia. Esta afirmación se comprobará en este trabajo con un caso de aplicación.

Esta metodología deja abierta la posibilidad de realizar variaciones de descarga a nivel horario que son imposibles de registrar a nivel diario, a la escala diaria se presentaría un fenómeno de enmascaramiento de evento horarios en los resultados diarios.

Los resultados de la metodología en ningún caso presentan series de variación diarias, solo se muestran gráficas de tasas de ascenso y descenso medias por año. Esta serie de variación diaria es útil en casos de establecer restricciones de manejo y de conservación ambiental.

Otra falencia es la ausencia de un índice de almacenamiento y descarga del embalse. Este se infiere de manera indirecta del gráfico del ciclo anual. Este índice es importante para identificar los meses de almacenamiento y descarga de altos y bajos caudales. También es importante para establecer relaciones de las políticas de operación y las fluctuaciones de factores de mercado energético.

Quizás la falencia conceptual más importante está centrada en la relación espacial de los datos de entrada de la metodología. Esta no incorpora ningún tipo de análisis multifactorial que puede existir aguas arriba y abajo del embalse que alteren o modifiquen los datos y los resultados del análisis. No incorporar o no considerar la existencia de otros embalses aguas arriba y aguas abajo, los aportes de caudal que recibe la corriente después de la descarga y no establecer zonas de influencia de los resultados encontrados es un condicionante relevante.

### **3.1.3 Aplicabilidad**

La metodología es altamente aplicable al tener unos requerimientos mínimos en cuanto a la información necesaria para poder ser usada. Solo es necesaria una serie de registros diarios antes y después de implantada la alteración hidrológica. Esta información existe en la mayoría de los casos de embalses en Colombia, ya que la mayoría de estos proyectos fueron concebidos con series hidrológicas previas en corrientes monitoreadas.

En Colombia la existencia de la información no garantiza su obtención, ya que algunos de estos monitoreos de estaciones hidrológicas se han delegado a entidades privadas que se encargan cambiar el carácter de esta información a confidencial. Casos como el de E.P.M. y el de URRRA I donde el IDEAM delegó este monitoreo son un buen ejemplo. En el mejor de los casos esta información se debe comprar.

### **3.1.4 Software**

Afortunadamente esta metodología se encuentra acompañada de un software desarrollado por Richter y su grupo de colaboradores. Este software se encuentra disponible en la página:

<http://www.nature.org/initiatives/freshwater/conservationtools/art17004.html>

Este fue desarrollado en el lenguaje FORTRAN, su interfase es amigable y desarrollada para el sistema operativo Windows de Microsoft. Esto se convierte en una fortaleza al ser de libre distribución.

## **3.2 Propuesta Metodológica AVFD (Análisis basado en la Variabilidad, Frecuencia y Duración)**

Una de las finalidades de este trabajo es presentar una propuesta metodológica que integre los conceptos propuestos por la metodología IHA y que incorpore herramientas metodológicas que permitan evaluar la alteración hidrológica a resolución horaria. A continuación se presenta esta propuesta.

Antes que nada, la aplicabilidad de esta propuesta debe ser evaluada. Para esto se debe tener clara y disponible la mayor cantidad de información a resolución diaria y horaria relevante para poder comparar el periodo PRE y POS embalse.

Se debe analizar la dinámica aguas arriba y aguas abajo del embalse. Esto con la finalidad de establecer si existen otros factores que alteren de alguna forma los balances hídricos. En este caso se cuentan los trasvases de aguas y la existencia de embalses de regulación aguas arriba del embalse analizado. Aguas abajo se debe revisar la existencia de corrientes de agua de mayor magnitud, es decir, la existencia de corrientes mayores a la analizada atenúan los efectos de los cambios hidrológicos encontrados y donde el área de influencia de estos cambios es menor. Aquí se debe evaluar la interrogante ¿Cuál corriente causa las mayores alteraciones? Además, se debe definir el orden jerárquico desencadenante de estas alteraciones.

Después de tener claro que este análisis se puede llevar a cabo, y que los resultados obtenidos tienen relevancia ambiental, se procede según sigue:

### **3.2.1 Análisis de las características generales de las curvas naturales de caudales y niveles a través del ciclo anual**

Este procedimiento se hace para identificar las variaciones en las características generales de la serie, relacionadas principalmente con los caudales medios tanto en las épocas de aguas altas como en los periodos de estiaje. En esta se construyen los ciclos anuales de las series analizadas y se realiza un análisis comparativo PRE-POS embalse.

La evaluación de la mayor cantidad de series aguas abajo del embalse le incorpora confiabilidad al análisis y ayuda a entender las dinámicas aguas abajo del mismo con los ecosistemas existentes que son dependientes del régimen hídrico en análisis.

### **3.2.2 Cambios en la recesión de los caudales y acción pulsátil de la operación**

Este procedimiento se realiza a partir de la información diaria y horaria que se encuentre disponible. Es importante tener información suficientemente confiable y registros suficientemente largos que permitan obtener resultados de buena calidad.

La información de tipo horario en algunos casos es escasa en el medio, así que si no es posible obtenerla directamente del generador de energía, se puede obtener de los registros de la base de datos del CND (Centro Nacional de Despacho), para Colombia, y con la ayuda de la relación de potencia hidráulica, más unas suposiciones de eficiencia, se puede tener una serie de descargas horaria de buena calidad para la serie horaria POS embalse. Este fue el caso para la aplicación de esta metodología para el análisis realizado a Urrá I que se desarrolla en el capítulo 4 de este trabajo.

En esta etapa se realizan curvas de duración comparativas para cada mes a resolución diaria con la finalidad de analizar la operación del embalse y las alteraciones en las curvas o las descargas mes a mes y se evalúa además, la estacionalidad del ciclo. Se establecen las temporadas donde la alteración se hace mas evidente.

También se realizan comparaciones gráficas de las series de descargas horarias, con la hipótesis de que para la serie histórica PRE la variación diaria registrada se reparte de forma lineal a lo largo de las 24 horas del día. En casos donde la cantidad de datos sea voluminosa se recomienda realizar la comparación estacional de datos. De este se pueden obtener gráficas características de la recesión o verano y la de invierno a nivel horario.

Si existen descargas en forma pulsátil aquí se hacen evidentes, caso en el cual cobra importancia los pasos siguientes de esta metodología.

### **3.2.3 Estimación cambios en la variabilidad de las magnitudes de los caudales**

Como primer análisis de variabilidad se calcula mediante la diferencia algebraica, la serie de variación de caudales para las series diarias PRE y POS embalse. Mediante la diferencia algebraica de los registros secuenciales se realizan estas gráficas. Estas son indicativas de los cambios estacionales típicos de verano y de invierno, además, son indicativas de la variabilidad en los eventos máximos y mínimos de la serie natural y de la serie de descargas.



### 3.2.4 Estimación de los cambios en las frecuencias y duraciones de los eventos

Es importante establecer como se comporta la serie de descargas y ver cuanto se desvía de las curvas naturales de la corriente. Para esto se evalúa la estabilidad de la serie de descargas respecto a un determinado caudal.

Para determinar este tipo de cambios, se emplea un procedimiento que consiste en identificar y caracterizar en la serie de registros, los periodos donde un determinado caudal es igualado o excedido y cuando no lo es, ver Figura 3.2. Para cada uno de los caudales presentes en la serie se cuenta el numero de veces que este es igualado o excedido y viceversa, además se registra su duración. Como resultado de este análisis se obtienen histogramas de frecuencias relativas de los eventos registrados, histogramas de frecuencias absolutas y gráficos de duración máxima y media de los eventos para cada caudal umbral.

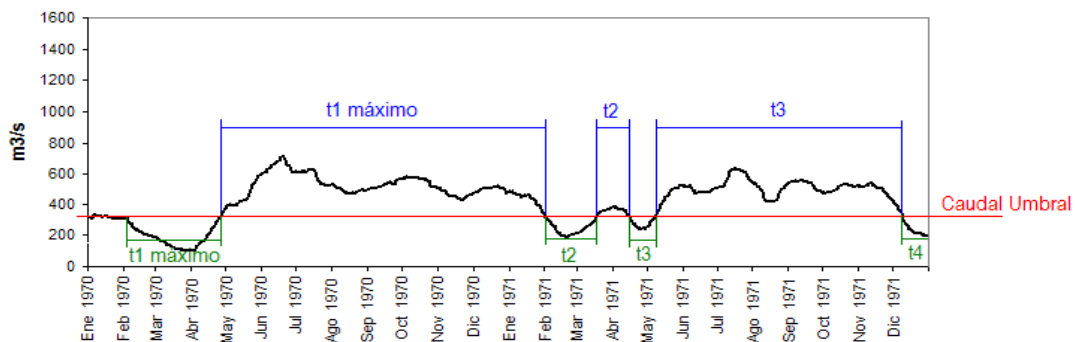
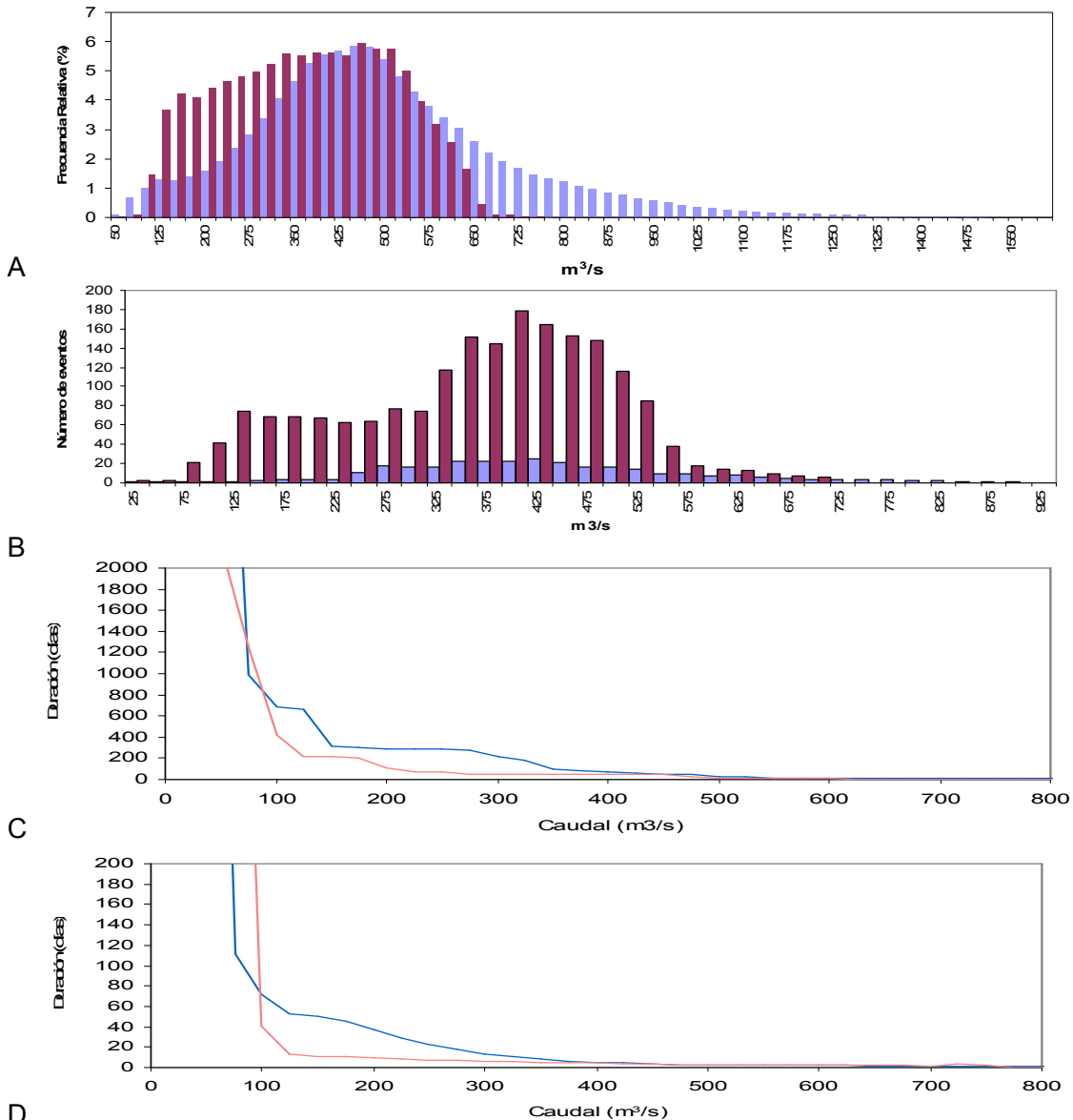


Figura 3.2. Selección de eventos de excedencia y no excedencia de caudales en una serie de registros.

#### Evento

*En este trabajo se denomina a evento cuando la serie en análisis sobre pasa un límite establecido. A cada evento se le registra la duración y se registra un contador que totaliza los eventos presentados en un periodo de tiempo previamente establecido.*

Durante este trabajo se desarrolló un algoritmo en EXCEL, capaz de realizar la selección de eventos y de registrar, para cada caudal umbral, la frecuencia y la duración del evento a lo largo de toda la serie de registros y de realizar las gráficas de frecuencia y de duración de estos eventos. Este puede ser aplicado para series de caudal y de nivel a resoluciones diarias y horarias como se aprecia para el caso de aplicación Urrá I. Ver Figura 3.3.



**D** **Figura 3.3.** A. Gráfico comparativo de frecuencias relativas. B Gráfico comparativo de frecuencias absolutas. C Gráfico comparativo de duración máxima de eventos. D Gráfico comparativo de duración media de los eventos.

El gráfico de frecuencias relativas muestran como se distribuyen los eventos en el rango de caudales, los gráficos de frecuencias absolutas muestran la frecuencia con que son registrados los eventos, las gráficas de duración máxima y media de los eventos muestran comparativamente los cambios en la duración para cada caudal umbral a lo largo de el rango de caudales de la serie. Todas estas son herramientas comparativas que están disponibles para ser aplicadas.

Para comprender con mayor claridad como funciona esta metodología y como se desarrolla el análisis de datos a diferentes escalas se describe mediante un ejemplo, el funcionamiento del algoritmo antes mencionado.

En primera instancia, se supondrán dos series hipotéticas de datos los cuales pueden ser caudales o niveles, una de ellas con mayor variabilidad que la otra y que conservan la misma tendencia central pero no su desviación. En la Figura 3.4 se aprecian las series hipotéticas de la variable Q en intervalos de tiempo t.

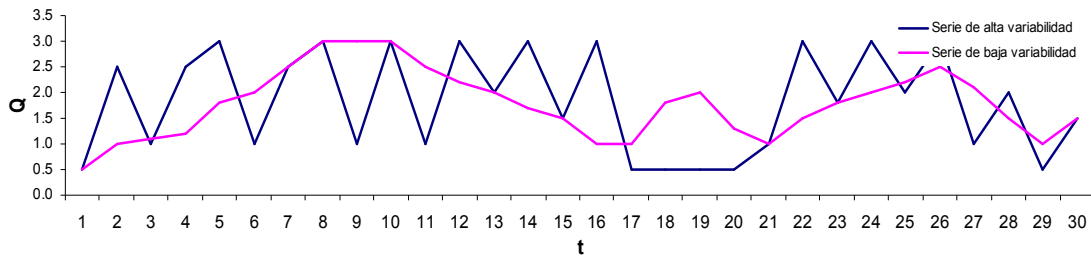


Figura 3.4. Series hipotéticas de alta y baja variabilidad

En estas series, la variable t, representa el tiempo que pueden ser días u horas dependiendo del objetivo que se busque con el análisis. Se debe determinar un rango de variación amplio (que incluyan los valores máximos y mínimos) común a las dos series, en este caso el rango de variación de Q esta entre 0,5 y 3,0. Se determinan los valores umbrales  $Q_i$  0,5 – 1,0 – 1,5 – 2,0 – 2,5 – 3,0. Para cada uno de estos  $Q_i$  se evalúa la expresión  $Q \geq Q_i$  mediante un contador y cada vez que la serie pasa el  $Q_i$  con otro contador. La determinación de estos contadores se aprecia en la Tabla 3.1 para la serie de baja variabilidad y en la Tabla 3.2 para la serie de alta variabilidad.

Se debe aclarar que esta herramienta solo debe ser usada para comparar periodos de similar escala temporal o que contengan la misma cantidad de datos y que estén en la misma resolución.

Tabla 3.1. Valores umbrales  $Q_i$  y contadores de la serie hipotética de baja variabilidad

T	Q(m3/s)	$Q_i$						Eventos					
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1	0.5	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	1.0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
3	1.1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1.2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1.8	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6	2.0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
7	2.5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0

8	3.0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
9	3.0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
10	3.0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
11	2.5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
12	2.2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
13	2.0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1.7	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
15	1.5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1.0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
17	1.0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	1.8	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
19	2.0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
20	1.3	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
21	1.0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	1.5	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
23	1.8	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	2.0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
25	2.2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
26	2.5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0
27	2.1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
28	1.5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
29	1.0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
30	1.5	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Tabla 3.2. Valores umbrales  $Q_i$  y contadores de la serie hipotética de alta variabilidad

t	Q(m3/s)	$Q_i$						Eventos					
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1	0.5	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	2.5	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
3	1.0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
4	2.5	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0
5	3.0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
6	1.0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
7	2.5	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0
8	3.0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
9	1.0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
10	3.0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
11	1.0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
12	3.0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
13	2.0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
14	3.0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1
15	1.5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
16	3.0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
17	0.5	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
18	0.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

19	0.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0.5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	1.0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
22	3.0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
23	1.8	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
24	3.0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
25	2.0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
26	3.0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1
27	1.0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
28	2.0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
29	0.5	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
30	1.5	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0

Con este algoritmo se identifican para cuales  $Q_i$  se presentan mas eventos, es decir, cuales valores son los que se sobrepasan con mayor o menor frecuencia (Gráfico de frecuencias absolutas), además se cuantifica su duración promedio y máxima.

A primera vista no se aprecian diferencias notables en las tablas anteriores, pero gráficamente podemos apreciarlas. En la Tabla 3.3 y Tabla 3.4 se puede apreciar un resumen de las frecuencias (# de eventos), duraciones medias ( $D$  media) y máximas ( $D$  max) de los eventos encontradas para cada umbral ( $Q_i$ ) en las dos series analizadas. En la Figura 3.5 se presentan gráficamente las frecuencias de eventos encontradas para las dos series donde, claramente se aprecian cambios en la frecuencia para los  $Q_i$  comprendidos entre 1 y 3. Así mismo, se encontraron diferencias notables en las duraciones medias y máximas de los eventos de las series, ver Figura 3.6 y Figura 3.7.

Tabla 3.3. Resultados serie baja variabilidad

<i>Resultados SERIE BAJA VARIABILIDAD</i>						
<i>Q medio</i>		<i>1.8</i>				
<i>Q<sub>i</sub></i>	<i>0.5</i>	<i>1</i>	<i>1.5</i>	<i>2</i>	<i>2.5</i>	<i>3</i>
<i>D media</i>	30	29	3	2.2	1.5	1.5
<i>D max</i>	30	29	11	8	2	1
<i># Eventos</i>	1	1	7	6	4	2

Tabla 3.4. Resultados serie alta variabilidad

<i>Resultados SERIE ALTA VARIABILIDAD</i>						
<i>Q medio</i>		<i>1.8</i>				
<i>Q<sub>i</sub></i>	<i>0.5</i>	<i>1</i>	<i>1.5</i>	<i>2</i>	<i>2.5</i>	<i>3</i>
<i>D media</i>	30	4.8	1.2	0.8	0.6	0.5
<i>D max</i>	30	15	5	3	2	1
<i># Eventos</i>	1	5	15	18	20	18

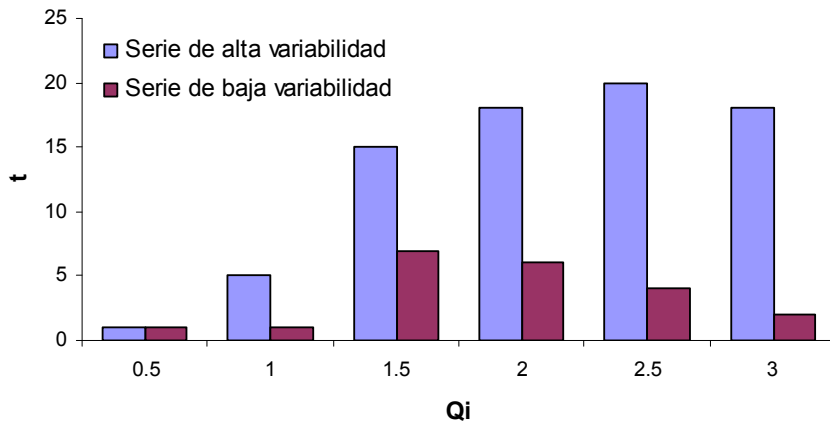


Figura 3.5. Frecuencia absoluta de eventos. Serie de alta y baja variabilidad

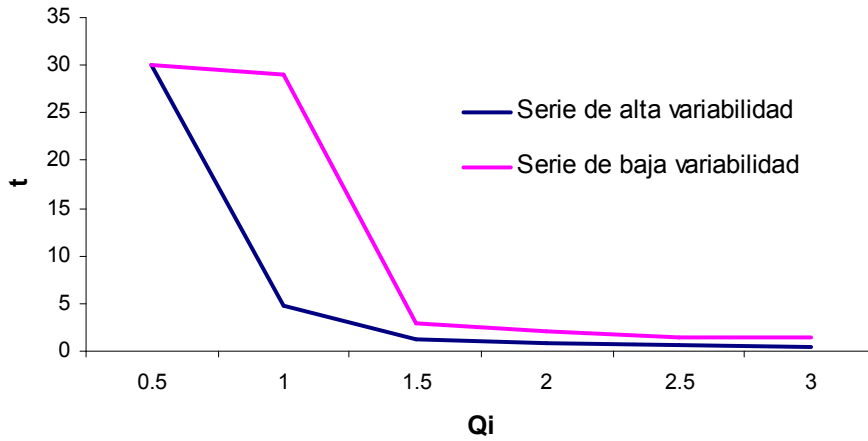


Figura 3.6. Duración media de eventos. Serie de alta y baja variabilidad.

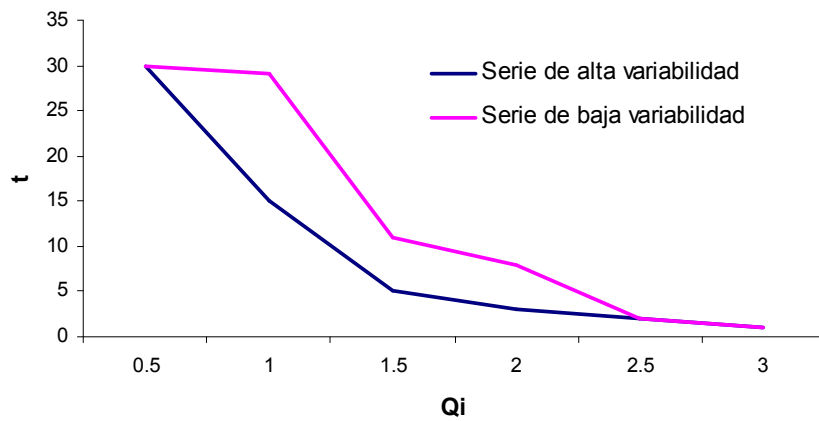


Figura 3.7. Duración máxima de eventos. Serie de alta y baja variabilidad.

Es importante caracterizar, mediante este procedimiento, cuales son las frecuencias de eventos que presenta la serie natural y sus duraciones típicas, estas características se pueden usar como línea base para establecer los rangos de variación y duración de las series no alteradas o naturales.

Utilizar series de distinta duración imposibilita comparar de manera equitativa las frecuencias encontradas para cada una de las series, por eso se debe tener claridad de la resolución y duración de las series a analizar.

### **3.2.5 Análisis de la variabilidad diaria histórica Vs variabilidad horaria**

Este análisis solo se podrá hacer cuando la información a resolución diaria sea lo suficientemente confiable y consiste en calcular para cada secuencia de registros y mes por mes, la diferencia algebraica entre un registro y el siguiente, creando así una serie de variabilidad. De esta serie se separan los registros positivos y negativos y se calcula su media. La media de los registros positivos es la tasa media de ascensos y la media de los registros negativos es la tasa media de descensos.

Estos índices se deben calcular para la serie histórica diaria y para la serie de descargas horarias. Las relaciones encontradas entre estos valores son parámetros importantes en las políticas de operación de embalses con criterios ambientales.

## **3.3 Información Disponible**

Para la aplicación de estas metodologías se utilizó información de diferentes resoluciones y de diferentes fuentes.

### **3.3.1 Registros Diarios**

Las series históricas de caudal y niveles a resolución diarias fueron suministradas por el IDEAM y estas fueron 4 estaciones de información de caudales y 1 de niveles. Estas son la base para el análisis PRE embalse. Ver Tabla 3.5. Las estaciones de caudal están ubicadas aguas abajo del embalse, una de ellas en el sitio de la descarga de Urrá I, y la estación de nivel está ubicada en el Complejo Lagunar del Bajo Sinú

Para el periodo POS embalse se tienen los registros diarios realizados por el consorcio Urrá I –IDEAM. Ver Tabla 3.5.

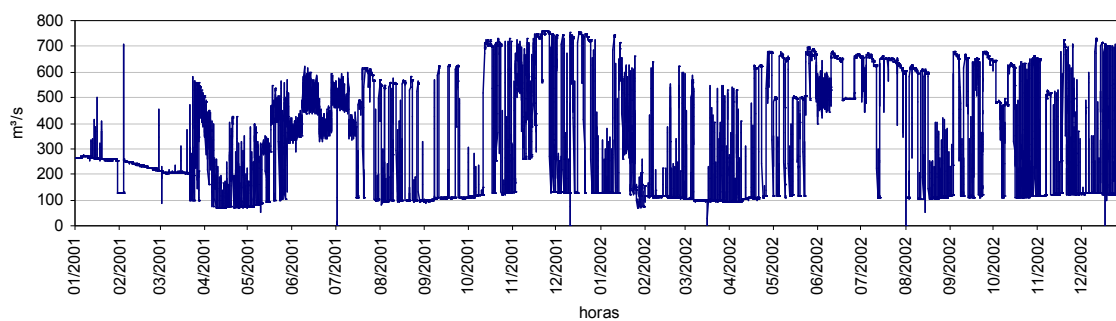
**Tabla 3.5.** Estaciones de registro diario. Base para el análisis de alteración hidrológica.

Estación	Tipo	Código	Latitud	Longitud	Periodo IDEAM	Periodo Consorcio
Angostura de Urrá	LG	1303701	8° 00'	-76° 15'	1969-1995	1999-2005
Montería	LG	1306702	8° 46'	-75° 52'	1968-2000	2004-2005
Sabana Nueva	LM	1307701	9° 02'	-75° 50'	1969-2000	
Cotoca Abajo	LG	1307706	9° 13'	-75° 51'	1970-2000	
Momil	LM	1307702	9° 14'	-75° 41'	1969-1991	1999-2005

### 3.3.2 Registros Horarios

Como ya se había dicho, la serie de registros horarios es de difícil obtención ya que posee restricciones por parte del generador de energía. Debido a este hecho se procedió a reconstruir la serie de descargas horarias indirectamente. La fuente en este caso es la base de datos del mercado energético colombiano llamada NEON manejada por XM, expertos en mercados, cuya información es limitada pero es la fuente de registros horarios a la que se tiene mayor facilidad de acceso.

Los datos extractados de NEON corresponden a registros de energía real generada y se convierten, mediante la expresión de potencia hidráulica y con una relación de eficiencia del 85%, a series de caudal horario. Ver Figura 3.8.



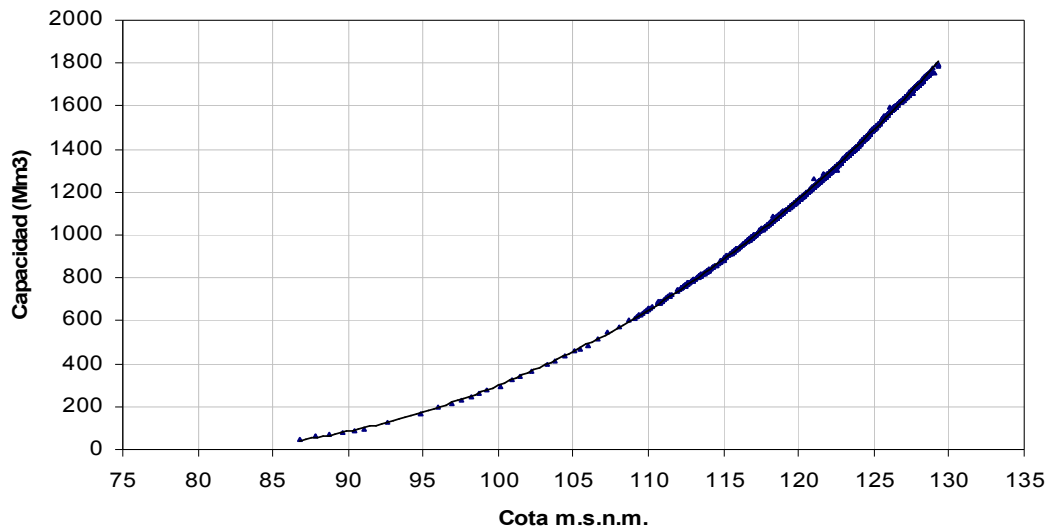
**Figura 3.8.** Caudales horarios turbinados por Urrá I. Años 2001 y 2002.

Cuando se evalúa la eficiencia hidráulica de una central, en este caso la de Urrá I, se deben tener en cuenta los registros de eficiencia de la central, pérdidas en las obras de captación y conducción, además de la eficiencia propia de las maquinas (turbinas) y



generadores. Como no se tienen registros de eficiencia se suponen algunos factores como la variación de la cabeza potencial causada por el volumen almacenado, la cota del embalse sobre el nivel de mar y volumen útil del embalse. En la Figura 3.9 se puede apreciar la curva de capacidad propia de Urrá I.

Según la curva de capacidad, la variación de niveles en el embalse es de 20 metros, variando desde la cota 128 m.s.n.m. hasta la cota 108 m.s.n.m., teniendo en cuenta que el eje de las turbinas se encuentra en la cota 68 m.s.n.m. se establece una variación para la cabeza potencial entre 40 m.c.a. y 60 m.c.a. (metros columna de agua). Con este rango de variación de los niveles se calcula la presión estática o cabeza hidráulica en m.c.a. Para el cálculo de este nivel en el embalse se utilizó la serie de registros diarios históricos de nivel del embalse reportados por URRRA E.S.P. en sus reportes oficiales.



**Figura 3.9.** Curva de capacidad de Urrá I. Datos Históricos.

Para determinar el caudal descargado por la central se calcula primero la cabeza potencial diaria según lo descrito en el párrafo anterior y de la serie de energía real generada horaria se obtiene un caudal horario de descarga mediante la relación de potencia hidráulica. A este último caudal se le suma el caudal vertido, si lo hay, calculado mediante un balance diario como el exceso de agua almacenada por unidad de tiempo.