

# Proyecto hidroeléctrico Ituango: manejo ambiental adaptativo de la fase de llenado

## Sustentación técnica ambiental de la solicitud de modificación de la licencia ambiental



14.11.2013



26.02.2014

*Boca del río Ituango en dos escenarios contrastantes: a la izquierda, en plena estación lluviosa de 2013; a la derecha poco después de la desviación del río Cauca para iniciar la construcción de la presa, a mediados del estiaje de 2014. Notorias diferencias en turbidez (concentración de sólidos en suspensión), velocidad de las corrientes y turbulencia; perímetro húmedo, altura de los taludes expuestos y formación incipiente de depósitos de gravas y sedimentos finos, aún en orillas empinadas. El follaje muerto de la vegetación caduca alcanza el agua en donde se descompone y se convierte en alimento de bacterias e inicia una cadena trófica basada en detritos y perifiton, característica de los ríos neotropicales cargados de sedimentos. Esta ilustración es un preludio de las condiciones esperadas durante el llenado del embalse Ituango.*

Medellín, 1.6.2014

# Proyecto hidroeléctrico Ituango: manejo ambiental adaptativo de la fase de llenado

## Sustentación técnica ambiental de la solicitud de modificación de la licencia ambiental

Medellín, 1.6.2014

### I Introducción

La creación del embalse Ituango (punto medio del pie del talud superior de la presa, localizada en 7° 8' 10,20" N 75° 39' 45,00" O ca. 235 m aguas arriba de la desembocadura del río Ituango; altitud 210 m snm, labio superior del vertedero a 420 m snm; profundidades mínima - máxima: 180 - 210 m; áreas mínima - máxima 2.800 - 3.835 ha; volúmenes: total 2.721, útil 996, muerto 1.724 hm<sup>3</sup>; operará a filo de agua con caudales medios de 1.000, mínimos de 220 y máximos de 5.126 m<sup>3</sup>/s, estos dos últimos con intervalos de recurrencia de 100 años), conlleva alteraciones hidrológicas, con consecuencias sobre la estructura y funcionamiento ecológicos del sistema río Cauca, en tres momentos<sup>1</sup>:

- (i) durante su formación, es una situación permanente y posiblemente trascienda la vida útil de la instalación, aún así se desmantelen sus componentes; las opciones de manejo para las consecuencias previstas sobre los organismos acuáticos son limitadas a mitigación y compensación.
- (ii) durante el llenado, es este un evento singular, tiene una duración corta, del orden de magnitud de días; aunque la alteración hidrológica es inevitable, sus consecuencias pueden diferir según se opte por el manejo de uno o más atributos del comportamiento hidrológico del río Cauca.
- (iii) durante la reposición del volumen almacenado, es un evento recurrente y de corta duración; ocurrirá siempre que el nivel del embalse esté por debajo del azud del vertedero (< 403 m snm) y la descarga por turbinas sea mayor que el caudal entrante, e. g., al final de la estación lluviosa con niveles bajos del embalse o durante el estiaje en períodos de alta demanda de energía. Su probabilidad de ocurrencia es baja dado que el embalse Ituango operará a filo de agua, es decir el volumen de agua que ingresa al embalse es en promedio igual al agua que se turбина, calculado sobre períodos cortos de tiempo, del orden de horas a días.

Aunque la licencia ambiental para las obras y operación de las instalaciones ya fue otorgada por la autoridad ambiental competente<sup>2</sup>, EPM ha encontrado necesario reconsiderar el manejo ya autorizado del llenado, por cuanto éste presenta inconvenientes técnicos y ecológicos. Desde comienzos de 2012 la Junta de Asesores del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (JAPHI) identificó<sup>3</sup> complejidades técnicas singulares asociadas al tamaño y profundidad de una compuerta en la descarga de fondo y a su operación con cierres parciales, requeridos para mantener un flujo constante de 450 m<sup>3</sup>/s como caudal de reposición durante las primeras horas del llenado del embalse. En informes posteriores<sup>4</sup>, la JAPHI ratificó estos análisis y recomendó:

- (i) eliminar la descarga de fondo,
- (ii) construir la descarga intermedia a una profundidad mayor y
- (iii) re-analizar el manejo ambiental del llenado del embalse Ituango con las consideraciones derivadas de los puntos anteriores y tomando en consideración uno o más de las siguientes modificaciones del plan de manejo del llenado:
  - posibilidad de reducir el caudal ambiental a 250-300 m<sup>3</sup>/s en atención al carácter singular y de corta duración del llenado;
  - establecer los requerimientos de caudal y caracterizar el (los) punto(s) crítico(s) más cercano(s) a la presa en donde puedan ocurrir interferencias con el aprovechamiento de recursos;
  - reemplazar el concepto de un *flujo constante* de 450 m<sup>3</sup>/s por uno de *flujo promedio* mediante la construcción de dos o

<sup>1</sup> Se hace aquí una referencia, aparentemente redundante, al represamiento de un río o creación de un embalse. Ciertamente que no se puede operar un embalse vacío y no se llena uno a menos que tenga una presa. Sin embargo, los procesos ecológicos asociados con la construcción de la obstrucción en el cauce del río, con el llenado del vaso así formado y con las alteraciones ecológicas derivadas de los desembalses de aguas en cantidades, calidades y oportunidades diferentes a las del río original, ameritan esta distinción.

<sup>2</sup> Resolución N° 0155 del 30 de enero de 2009, otorgada por la entonces Dirección de Licencias, Permisos y Trámites Ambientales del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, hoy Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

<sup>3</sup> EPM Ituango. 2012. Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Construcción del proyecto. Informe n° 1 Junta de Asesores. Medellín, febrero 2012. 51 pp.

<sup>4</sup> EPM Ituango. 2013. Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Construcción del proyecto. Informe n° 2 Junta de Asesores. Medellín, agosto 2013. 36 pp.

EPM Ituango. 2013. Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Construcción del proyecto. Informe n° 3 Junta de Asesores. Medellín, noviembre 2013. 39 pp.

tres compuertas en paralelo, en la descarga intermedia, eliminando así la necesidad de cierres parciales de dicha descarga que es la síntesis de la problemática.

"(...) [JAPHI considera que] *los riesgos que implica la descarga de fondo para cumplir las exigencias de un caudal mínimo de 450 m<sup>3</sup>/s durante el llenado del embalse no compensan los beneficios ambientales que se obtendrían. (...) Recomienda que se prepare un informe sobre este aspecto y se insista ante la ANLA en la modificación de los requerimientos de caudal ecológico basado en aspectos técnicos del alto riesgo para el proyecto y los impactos ambientales mínimos que se tendría bajo el esquema propuesto [por JAPHI]. (...)*"

El presente documento desarrolla esta revisión desde un punto de vista ecológico<sup>5</sup>. Una síntesis de las complejidades técnicas y de los riesgos de construir y operar una descarga de fondo en el embalse Ituango para reponer un caudal constante de 450 m<sup>3</sup>/s se puede ver en el Anexo 1.<sup>6</sup> Este documento presenta:

- (i) el enfoque metodológico para la revisión de la gestión ambiental del proceso de llenado
- (ii) una síntesis del esquema de manejo actual
- (iii) un análisis las implicaciones mencionadas, con énfasis en las ecológicas, a la luz de los resultados de los estudios limnológicos, ictiológicos y pesqueros adelantados en áreas de influencia del PHI en el sistema río Cauca, durante los últimos 10 años,
- (iv) un abanico de alternativas de manejo del proceso de llenado y
- (v) la recomendación de que EPM someta a consideración de la autoridad ambiental una nueva solicitud de modificación de la licencia ambiental, con base en los resultados del presente análisis.

<sup>5</sup> Esta revisión está en armonía con los criterios y lineamientos de la autoridad ambiental: "La estimación y evaluación del caudal ambiental debe cumplir criterios de objetividad; flexibilidad; adaptabilidad; costo-efectividad; precaución ambiental; criterios ecosistémicos y de integridad." p. 4, en: MADS, ANLA. 2013. Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental. Bogotá, D. C. 66 pp. Proyecto de resolución ANLA disponible en: [http://www.anla.gov.co/documentos/Consultas\\_publicas/Res\\_Caudal\\_Ambienta\\_Publicación.pdf](http://www.anla.gov.co/documentos/Consultas_publicas/Res_Caudal_Ambienta_Publicación.pdf)

<sup>6</sup> Anexo 1. Consecuencias de una falla en la descarga de fondo durante el llenado del embalse

## II Metodología

El enfoque metodológico adoptado para el análisis ecológico del proceso de llenado, consiste en reiteraciones del ciclo problemática - análisis - solución<sup>7</sup>:

*definición y contextualización de problemáticas → establecimiento y verificación de relaciones causales y → formulación, prueba y jerarquización de soluciones a la → problemática inicialmente definida*

El punto de partida es la evaluación de la alteración ecológica esperada durante la fase de llenado del embalse Ituango. Los estudios ambientales del PHI y la evaluación de éstos realizada por la autoridad ambiental, asumen explícitamente que la alteración consiste en una reducción del *caudal medio* del río Cauca aguas abajo de la presa, durante el período de llenado y consecuentemente que el problema se minimiza en la medida que la reducción de caudal sea menor.

Esta aseveración conlleva implícito el concepto de que las *sequías* (y las crecientes) son perturbaciones que deben ser evitadas y por tanto desconoce la importancia ecológica de su intensidad, duración y recurrencia. Por esta razón, es necesario desagregar el fenómeno de retención del caudal en el embalse y definir, de manera hipotética, las relaciones causales entre el fenómeno hidrológico-hidráulico causado por esta retención y los procesos ecológicos en el sistema río Cauca aguas abajo de la presa. Esta reflexión lleva al planteamiento de los siguientes interrogantes como núcleo del enfoque metodológico.

1. ¿Qué se evalúa? La alteración ecológica durante llenado del embalse Ituango, derivada del cierre de las compuertas de la desviación del río Cauca; i. e., el escenario extremo: llenado del embalse sin paso de caudal ambiental
2. ¿En dónde se evalúa? La alteración es función inversa de: (i) la distancia al sitio de presa y (ii) del caudal de reposición ( $Q_r$ ) aportado por las cuencas bajas<sup>8</sup>.

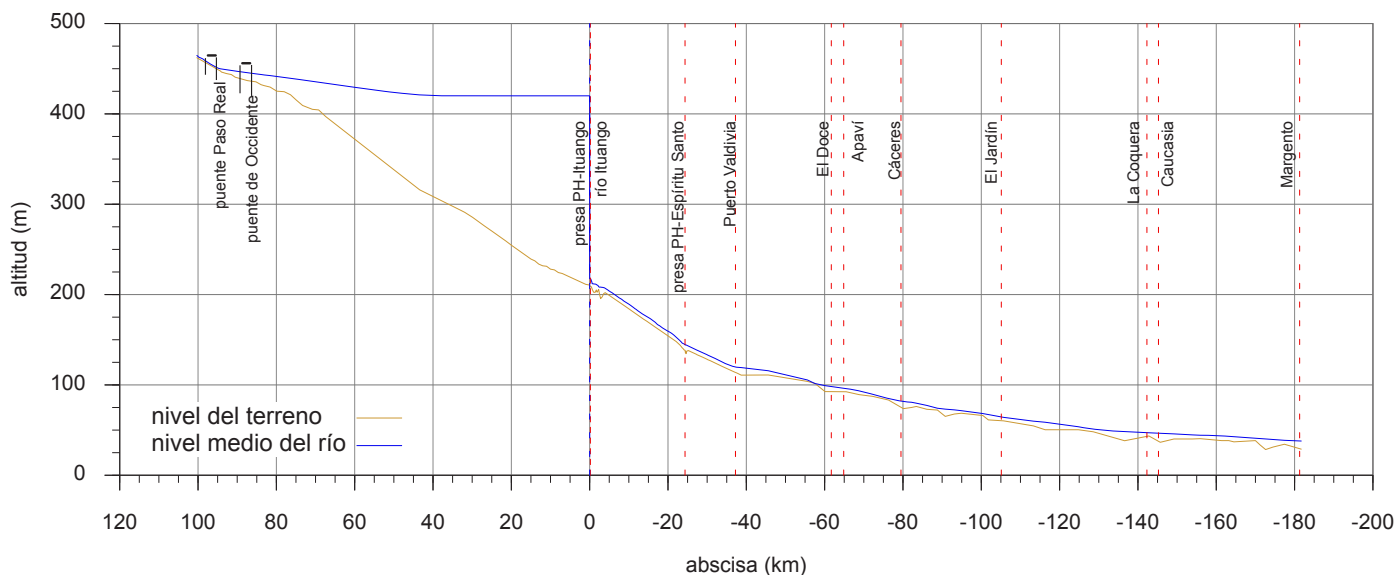
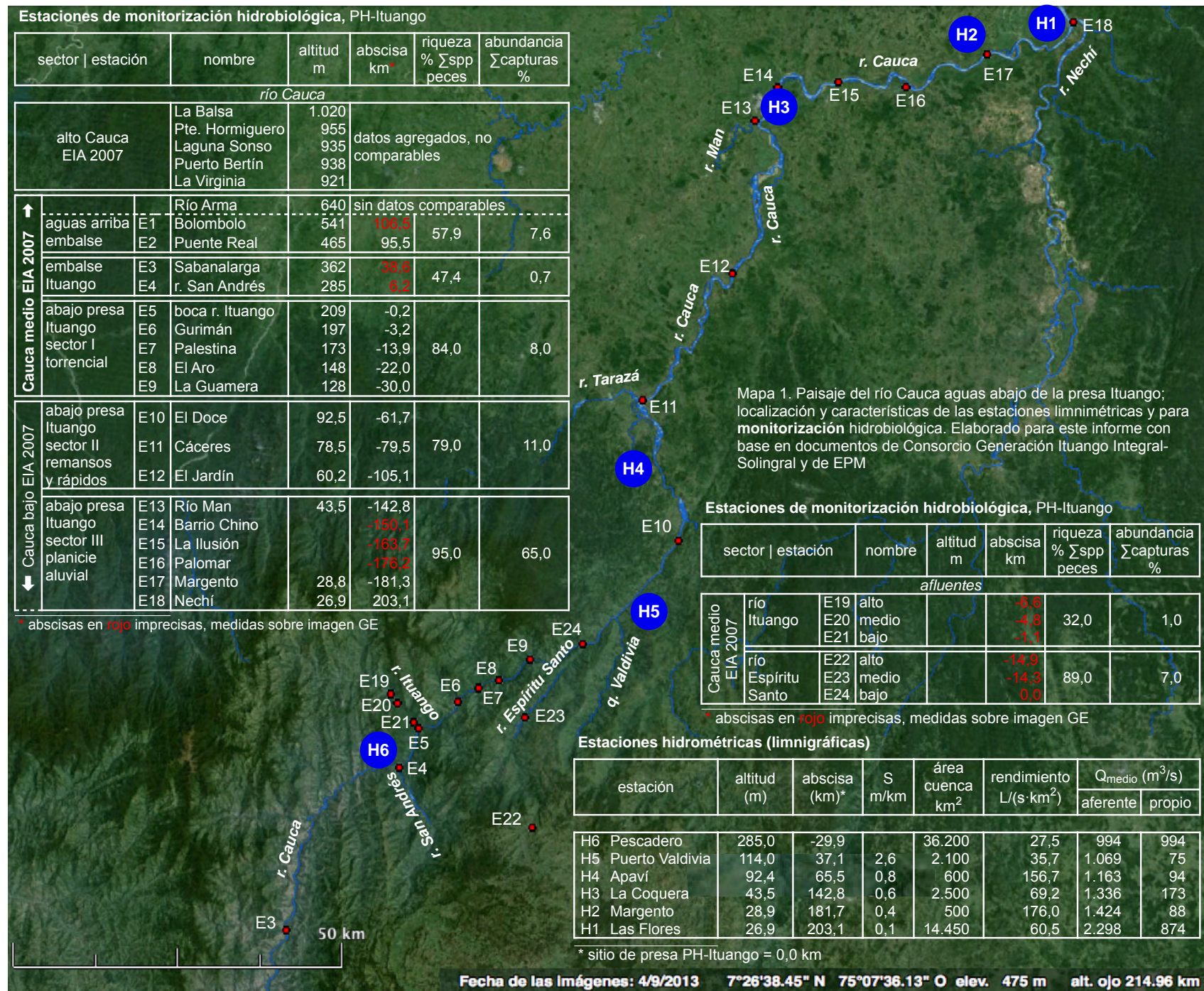


Fig. 1. Perfil del río Cauca desde la cola del embalse Ituango hasta la planicie aluvial, arriba de la boca del río Nechí

Un análisis somero del perfil del río, (véase fig. 1., mapa 1.) y tomando los caudales de reposición ( $Q_r$  con  $p = 0,25$ ), se distinguen los tres tramos definidos en la tabla 1. Esta sectorización del río coincide grosso modo con la derivada de los estudios limnológicos, ictiológicos y pesqueros llevados a cabo para el PH-Ituango desde 2004.

<sup>7</sup> El ciclo PAS es un “enfoque conceptual utilizado en investigaciones de evaluación, planeamiento y manejo de recursos y en general en la interpretación de procesos en los cuales intervienen y concurren factores diversos no siempre explícitos. PAS combina elementos de diagnóstico de cómo en la realidad ocurre un proceso determinado, con elementos de pronóstico acerca del comportamiento de dicho proceso cuando se introducen alteraciones en los factores participantes; el conjunto es un modelo o imitación arquetípica de la realidad.” Véase **Ciclo PAS**

<sup>8</sup> Durante la fase de estiaje (limnofase) del ciclo hidrológico anual del río, en la planicie aluvial pueden ocurrir reducciones de caudal por: (i) aislamiento de ciénagas (cesan los aportes al río) o (ii) por reversión de la dirección del caño (conexión río-ciénaga) y llenado de éstas; por esta razón se consideran independientemente los efectos de la distancia y del  $Q_r$



Mapa 1. Paisaje del río Cauca aguas abajo de la presa Ituango; localización y características de las estaciones limnimétricas y para monitorización hidrobiológica. Elaborado para este informe con base en documentos de Consorcio Generación Ituango Integral-Solingral y de EPM

\* abscisas en rojo imprecisas, medidas sobre imagen GE

\* abscisas en rojo imprecisas, medidas sobre imagen GE

Para la definición aquí descrita se tuvieron en cuenta la distancia y la pendiente longitudinal, medidas sobre el perfil del río y los caudales aportados por las cuencas aferentes bajas. No obstante, otras diferencias características se manifiestan en los tres tramos. El clima covaría con el gradiente altitudinal: la pluviosidad anual aumenta y la estacionalidad disminuye, lo cual trae como consecuencia un aumento considerable en los rendimientos (ca. 40,0 %) y caudales. El clima, aunado a la ampliación del valle fluvial, se refleja en el rápido cambio de bosques secos sobre suelos pobres y sobre-drenados del cañón del Cauca a los bosques pluviales e inundables del valle aluvial. En conjunto, estos paisajes manifiestan diferencias en abundancia y accesibilidad de recursos, patrones de poblamiento y status de conservación.

Tabla 1. Características del río Cauca aguas abajo de la presa Ituango

tramo	≈ abscisa <sup>1</sup> (km)		S (m/km)	área cuenca aferente (km <sup>2</sup> )	rendimiento (L/s/km <sup>2</sup> )	Q <sub>R</sub> (m <sup>3</sup> /s)		valle fluvial		
	i	f				i	f	geomorfología	biotopo	estado <sup>2</sup>
1° torrencial	0,0	23,6	2,9	1.140	45,8	0,0	58,1	encañonado	bosque seco (deciduo)	≈ natural
2° rápidos y remansos	23,6	65,5	1,2	697	102,2	58,1	129,3	V estrecho	transición a pluvial	modificado
3° planicie aluvial	65,5	181,7	0,6	3.326	114,8	129,3	505,3	planicie incipiente	bosque pluvial	alterado

<sup>1</sup> presa Ituango = 0,0 km; longitudes aproximadas pues los tramos son tan solo una conceptualización. El tramo 3° continua más allá de la abscisa final de la tabla, hasta la desembocadura del Cauca al Magdalena en el brazo de Loba, pero no se considera en este análisis del proceso de llenado pues  $Q_R > Q_I$

<sup>2</sup> sensu IUCN, UNEP, WWF. 1978. *Second Draft of a World Conservation Strategy*. International Union for the Conservation of Nature and Natural Resources. General Assembly Paper GA.78/9. 96+xxx p. Morges, Switzerland. Categorías de estado de conservación definidas en función de grado de intervención humana requerida para dar continuidad a procesos ecológicos; desde 0 ó mínima en condiciones *naturales* hasta máxima ó indefinida en condiciones *deterioradas* en las cuales es prácticamente imposible revertir a las condiciones originales; las categorías *modificadas* y *alteradas* son condiciones intermedias. Véase además [Neotrópicos\\_1996](#).

3. ¿Cómo se evalúa? La evaluación de la alteración ecológica se lleva a cabo mediante la comparación de alternativas de solución, i. e., de varias opciones de manejo de la fase de llenado. Ésta se facilita mediante la formulación de relaciones causales entre los varios factores que concurren en el nuevo sistema embalse - río.

En primer lugar, conviene reconocer que puede haber diferencias en el tipo y magnitud de las consecuencias ecológicas, según el atributo del comportamiento hidrológico del sistema que se altere y éstas además serán diferentes en cada uno de los tramos:

- el *factor hidrológico* es función de: la magnitud de la retención de caudal en el embalse; la duración de la retención y de la oportunidad, es decir la fase del ciclo hidrológico anual (estiaje, creciente o transición) en la que ocurra la alteración
- factor ecológico* es función de: las características de los biotopos (conjuntos de hábitats) acuáticos y de los terrestres y anfibios<sup>9</sup> con ellos asociados; de los requerimientos de las biocenosis (comunidades de organismos) que los habitan; y de la resiliencia de las biocenosis (capacidad de recuperación de biotopos y biocenosis con posterioridad a una perturbación natural o inducida artificialmente).
- factor social* es función de los usos de agua, del río y de los recursos acuáticos

La distinción de tres tramos abajo de la presa Ituango es aplicable, tanto a las características físicas: aportes de agua y sedimentos de las cuencas tributarias, pendiente longitudinal del tramo, amplitud de valle fluvial... como a diferencias ecológicas derivadas de éstas: profundidad media de la lámina de agua y fluctuaciones estacionales, anchura de cauce menor, tipos de substratos por acumulación y permanencia diferenciales de sedimentos y de materiales de arrastre.

<sup>9</sup> Hábitats anfibios son aquellos que presentan concurrentemente características de hábitats acuáticos y terrestres o fases alternas terrestres y acuáticas, no necesariamente de igual duración. Pueden ser permanentes, efímeros (semanas o meses) o de duración corta (años a lustros), muchas veces estacionales pero no necesariamente recurrentes ni con regímenes cíclicos; e. g., pantanos, playones, lagunas de marea, islas fluviales sujetas a inundación, charcas y pozos de bordes fluviales, islas, orillares, bancos, bajos, masas de vegetación flotante (taruya, firmes), etc.

### III Problemática

El llenado del embalse Ituango conlleva una cadena de consecuencias hidrológicas que a su vez desencadenan procesos ecológicos susceptibles de afectar hábitats, organismos y recursos aprovechables a distancias considerables del embalse y durante períodos prolongados<sup>10</sup>. Con el objetivo de sopesar los diversos factores antropogénicos y naturales que intervienen en estos procesos y que por tanto inciden sobre los resultados del manejo, se planteó un modelo conceptual de relaciones causales. Éste ha sido objeto de refinamiento paulatino con base en el conocimiento del funcionamiento actual del río Cauca. Véase figura 2.

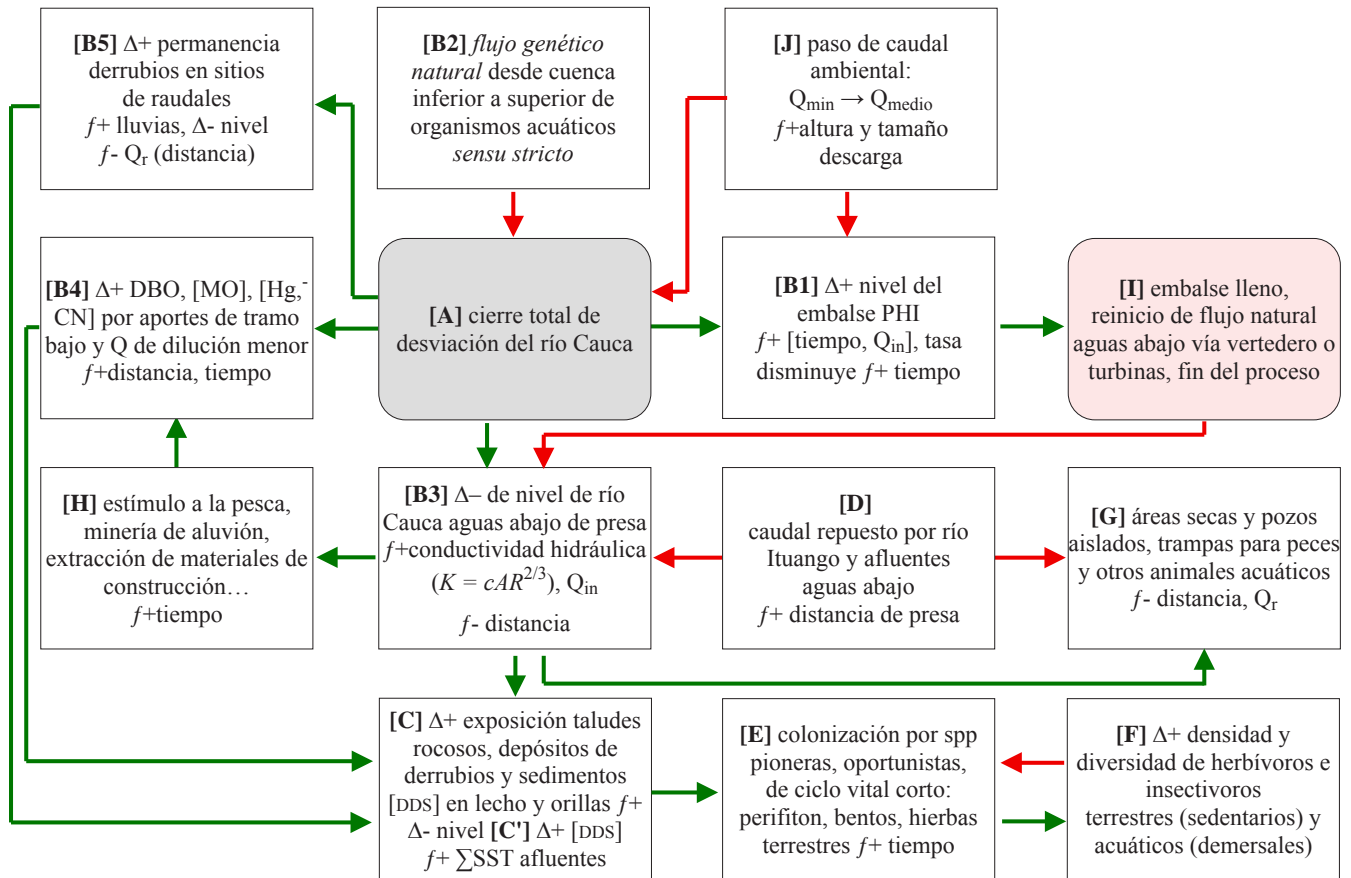


Fig. 2. Diagrama causal simplificado de las implicaciones ecológicas del proceso de llenado del embalse Ituango, sobre el tramo bajo del río Cauca. Las flechas indican el efecto de la variable de origen sobre la variable de destino y es positivo o de estímulo si la flecha es **verde** y negativo o de retardo si es **roja**.  $f+$  y  $f-$  significan que la variable es función directa o inversa de otra variable, la relación no necesariamente es causal, puede ser correlacional espuria o por covarianza. Convenciones: Δ+ = aumento; Δ- = disminución; tiempo = tiempo de llenado; distancia = distancia a sitio de presa;  $Q_{in}$  = caudal entrante al embalse;  $Q_r$  = caudal aportado por cuencas bajas; [DDS] = depósitos de derrubios y sedimentos;  $\sum$ SST sólidos suspendidos totales y material de arrastre.

Las cadena [A] a [I] constituye el ciclo básico de llenado del embalse, sin manejo, incluso sin el manejo exigido por la licencia ambiental<sup>11</sup>. El subciclo [A] → [B1] → [I] es el propósito fundamental del proceso: llenar el embalse, efectuar las pruebas de la infraestructura y equipos y poner en marcha la central hidroeléctrica. Los incrementos de nivel de embalse son función del caudal que ingresa al embalse; por la forma en V del valle, la tasa de ascenso del nivel disminuye con el tiempo, para un caudal determinado; véase fig. 3.

<sup>10</sup> EPM Ituango, Consorcio Generación Ituango. 04.10.2011. Actualización estudio de impacto ambiental-evaluación ambiental. Documento D-PHI-EAM-EIA-CAP05-C0006.pdf, numeral 5.1.3.2.8 Transformación de ambientes lóticos a lénticos. p 5.56

<sup>11</sup> Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución n° 0155, 30 de enero de 2009. §9°, numeral 1.1.1. “Etapa de llenado: El caudal que se debe garantizar desde la estructura de la presa sin operar la casa de máquinas deberá ser de 450 m<sup>3</sup>/s.”

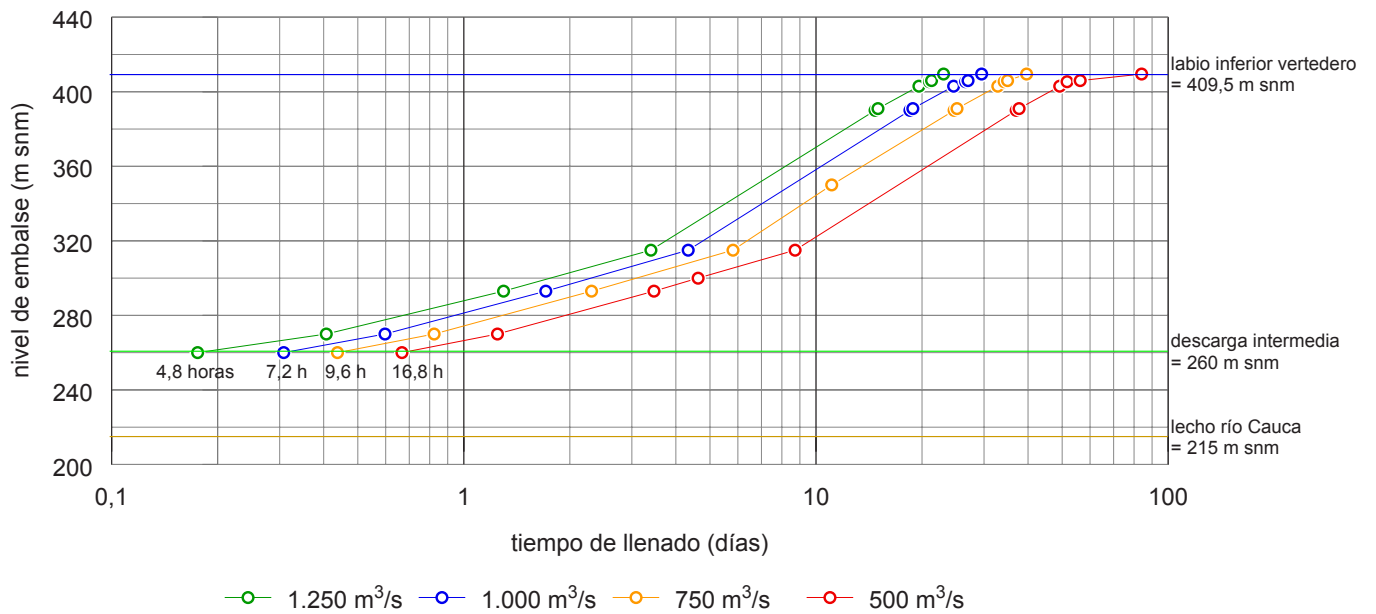


Fig. 3. Curvas de llenado de embalse Ituango para diferentes caudales de entrada ( $Q_{in}$  en la figura 2.), sin descargas ni de fondo ni intermedias, i. e.,  $Q_{ambiental} = 0,0$ . El caudal medio del río en el sitio de presa es ca.  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$  e implica un período de llenado de 20 días, es decir hasta que el nivel del embalse alcance la cota inferior del vertedero y los flujos aguas abajo de la presa sean los naturales del río. Si  $Q_{in} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$  (ligeramente más alto que  $Q_{ambiental}$ ), este tiempo se aproxima a 90 días. El tiempo de llenado hasta el nivel de la descarga intermedia es de 4,8 a 16,8 horas, períodos mínimo y máximo respectivamente, de retención de caudal sin reposición al río. El caso extremo sería un  $Q_{in}$  bajo,  $\leq 500 \text{ m}^3/\text{s}$ , con  $Q_{ambiental} = 450 \text{ m}^3/\text{s}$ ; esta retención neta de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , implicaría un tiempo de llenado del embalse  $> 12$  meses; su cálculo no es importante pues parte de una premisa poco realista cual es la persistencia de caudales bajos durante períodos prolongados.

El diagrama causal de la figura 2. es en realidad una simplificación del funcionamiento cíclico del sistema Cauca<sup>12</sup> en el cual se presentan situaciones contrastantes durante las fases de sequía (limnofase) y de creciente (potamofase)<sup>13</sup>; la primera es afín a la que se presentará durante el proceso de llenado y la segunda es análoga a lo que ocurrirá una vez se llene el embalse y se efectúen las pruebas de las descargas intermedias, del vertedero, las turbinas y la central entre en operación.

Por esta razón es válido inferir acerca de las consecuencias ecológicas del llenado y la subsecuente evolución del sistema Cauca una vez los caudales vuelvan a ser los naturales, a partir de la información recolectada durante los últimos diez años en diferentes condiciones de limno- y potamofase. Este procedimiento es, de cierta manera, la verificación de un modelo con información antecedente. A continuación se describen brevemente los procesos ecológicos involucrados en el llenado del embalse.

<sup>12</sup> Se elude aquí el término *ecosistema* para referirse al río Cauca por dos razones: (i) en sentido estricto, los ríos no son ecosistemas pues en estos predominan los intercambios de materia y energía entre los varios componentes (suelos, vegetación, animales...), mientras que en los ríos predominan los flujos (de materia y energía) a través de ellos [véase, e. g., : H. B. N. Hynes. 1972. The ecology of running waters. University of Toronto Press. 555 pp. Jörg Brehm, Meertinus P. D. Meijering. 1982. Fließgewässerkunde. Einführung in die Limnologie der Quellen, Bäche und Flüsse. Biologische Arbeitsbücher 36. Quelle & Meyer, Heidelberg. 311 pp ISBN 3-494-01061-7]; (ii) el análisis aquí detallado es sólo de un tramo del río y sólo de un número limitado de procesos ecológicos, aquellos asociados al llenado.

<sup>13</sup> Los términos *limnofase* y *potamofase* hacen referencia a cada uno de los hemiciclos hidrológicos y sus diferencias ecológicas, derivadas de la dirección predominante del flujo de agua en una planicie de inundación, definida por la diferencia de niveles del agua entre los cuerpos lagunares (ciénagas y madrevejas) de la planicie y el río: si el nivel en la planicie es más alto, el flujo es hacia el río, es *limnofase*; si el nivel en el río es más alto, el flujo es en dirección a la planicie, es *potamofase*. Alternativamente, estos hemiciclos se denominan de *estiaje* y *creciente*. En los sectores del río que no tienen planicie de inundación, el caso del Cauca entre el sitio de presa de Ituango y Puerto Valdivia, se emplean los mismos términos para referirse a la época y a las diferentes manifestaciones ecológicas y de aprovechamiento de recursos, sin que esto implique que el fenómeno de flujos laterales bidireccionales ocurre en el tramo en cuestión.



[B2] El cierre de la desviación del río Cauca reduce la de por sí ya baja posibilidad de flujo genético natural ascendente (desde la cuenca baja) entre poblaciones conespecíficas de peces y otros vertebrados acuáticos; el flujo genético descendente (desde la cuenca alta) persiste, aunque es disminuido por el efecto de barrera ecológica del embalse<sup>14</sup>. Esta será una situación permanente y, como se dijo, trascenderá la vida útil de la instalación hidroeléctrica.

El cierre de la desviación del río Cauca deriva también en al menos tres conjuntos de consecuencias adicionales, las que colectivamente se asimilan a un *episodio de sequía* recurrente, e. g., como los que ocurren durante eventos El Niño<sup>15</sup>:

[B3] El descenso del nivel del río durante el proceso de llenado es función del caudal que ingresa y se retiene en el embalse. La proporción del nivel reducido con respecto al valor natural (el *factor de sequía*), disminuye con la distancia del pie de presa, por aumentos del caudal de los afluentes [D] y por la disminución de la pendiente del río y ampliación del valle. Igualmente, las consecuencias del descenso de los niveles en el río son función inversa de la distancia.

<sup>14</sup> El flujo genético actual, para diferentes especies, es muy reducido, como se ha evidenciado en los estudios de las principales especies de peces del sistema Cauca, pero es bidireccional, con predominancia de flujo descendente. Después del cierre de la desviación, sólo será posible el flujo descendente y éste será aún más reducido que en la actualidad. Aves y otros vertebrados pueden transportar accidentalmente huevos y larvas de peces (ectozooecoría) en las dos direcciones; este mecanismo sin embargo no ha sido reportado para las especies de peces del río Cauca. Si durante el llenado opera la descarga de fondo para permitir el paso de caudal ambiental, es posible durante este breve período un mínimo flujo ascendente, aunque el momento de la masa de agua (> 2.250.000 N·s) y la oscuridad en este tramo posiblemente disuadan el movimiento ascendente. Véase:  
– EIA Anexo\_4.14- ictiofauna INFORME Ictiofauna\_Pesca\_Cauca\_Feb\_2014 Cap 4.2.6 Estudios Genéticos. Notas LCGL en diapositiva 42 de Presentación\_Estudios Icticos\_feb\_Preguntas-2014.pptx. Evidencia genética, poblacional, anatómica... de barreras entre La Virginia - La Pintada -salto El Caballo- y zona de raudales entre Ituango (puente Pescadero) y Pto. Valdivia.  
–EPM Ituango, Consorcio Generación Ituango. 04.10.2011. Actualización estudio de impacto ambiental-evaluación ambiental. Documento D-PHI-EAM-EIA-CAP05-C0006.pdf, numeral 5.1.3.2.5 Cambio en la abundancia de las especies que conforman la comunidad de peces en la cuenca del río Cauca p. 5-50

<sup>15</sup> Muchas publicaciones identifican los años con sequías o crecientes extraordinarias, véase e. g.:  
[http://www.comunidadandina.org/public/Atlas\\_13\\_El\\_Nino\\_y\\_La\\_Nina.pdf](http://www.comunidadandina.org/public/Atlas_13_El_Nino_y_La_Nina.pdf) [restringido a países andinos, excepto Venezuela, período 1970-2008];  
<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Soi.svg> [excelente gráfica, cubre período 1880-2010];  
<https://www.dropbox.com/sh/gp4haol5tf2ckn0/ofnVwv8PPO> [7 informes (presentaciones) de IGAC, IDEAM, DANE. 2011 sobre el evento La Niña de 2010-2011, publicados entre enero y agosto de 2011, sólo tienen registro de los eventos La Niña específicos para Colombia entre 1990 y 2010]



Foto 1. Sucesión terrestre temprana sobre depósitos recientes de derrubios (A) en quebrada afluente de río Cauca y en orillar rocoso expuesto por descenso del nivel del río (B). La sucesión progresa sólo si los niveles bajos persisten. La vegetación desarrollada en este hábitat efímero muere posteriormente con el ascenso de nivel, es descompuesta por bacterias y éstas a su vez son consumidas por peces iliófagos; los tallos leñosos de muy lenta descomposición, las rocas, las piedras y los sedimentos son colonizados por perifiton, el que a su vez es alimento para una cohorte compleja de peces de muchas especies, principalmente de la familia Loricariidae (cuchos o corronchos). Fotos 26.02.14

Este descenso generalizado de niveles tiene dos consecuencias contrastantes: el desarrollo paulatino de hábitats terrestres y semiterrestres [C] y [C'] (véase foto 1.) y el aislamiento de peces y otros animales acuáticos en los pozos así formados [G]. Estos efectos disminuyen con la distancia, como se anota en la figura 2. Es entonces el primer tramo, más cercano a la presa, el más crítico para el efecto de trampa; pero este tramo es también el menos susceptible de desarrollar hábitats terrestres por exposición de depósitos, puesto que corresponde al sector más estrecho del valle y de mayor pendiente, lo que limita la formación de pozos.

Esta situación fue documentada recientemente, con la formación de *lecho seco* entre la preatagüa de desviación del río y la descarga de los túneles de desviación y fue objeto del plan de contingencia de rescate de peces, previsto por el PMA<sup>16</sup>; véase foto 2.



Foto 2. Rescate de peces en el "lecho seco" formado aguas abajo de la preatagüa de desviación del río, en operación desde el 16.02.2014. Nótase la profundidad del río > 0,5 m, evidente por el pescador que vadea con una atarraya en medio del río. Foto 26.02.14

En [B4], los cambios derivados del llenado están relacionados con la reducción de caudal del río, no de los niveles de éste, aguas abajo de la presa; la carga contaminante no es aquella que trae consigo el río Cauca -que puede ser alta dadas la gran población en la cuenca superior y la intensa actividad agro-industrial- sino la que recibe el río aguas abajo del sitio de presa que es muy pequeña y proviene de dos fuentes fundamentales: descargas de aguas servidas de la población urbana y rural nucleada entre el sitio de presa y Caucasia y contaminación por materiales inertes (suelos y sedimentos) y tóxicos (cianuro y mercurio) asociados a la actividad minera, tanto artesanal como de mediana escala, cuyo control actual es muy laxo. Los menores caudales de dilución disponibles durante el llenado, aunados al posible aumento de la actividad minera en períodos de aguas bajas [H]<sup>17</sup> podrían aumentar dichas cargas contaminantes (véase foto 3.).



Foto 3. Campamento de mineros artesanales, recientemente instalado, aguas abajo del sitio de presa PH-Ituango. 26.02.14

En [B5] se conjugan los efectos de dos atributos de la alteración hidrológica durante el llenado: la disminución de la lámina y del caudal. La primera permite la exposición de depósitos de sedimentos y derrubios que son aportados permanentemente por las quebradas y ríos tributarios de los tramos 1° y 2° (agradación) y transportados por las crecientes del río (degradación).

<sup>16</sup> EPM. sin fecha. Plan de contingencia rescate de peces durante el desvío del río Cauca – Hidroituango, informe de actividades. Trabajo realizado entre 17.02. - 17.03.2014. Individuos rescatados 4.645 (4.611 vivos y liberados, supervivencia 99,3%), pertenecientes a 36 especies o morfoespecies, todas reportadas anteriormente para el tramo medio del río Cauca; las abundancias específicas difieren de las resultantes de las colecciones previas, particularmente por la frecuencia de especímenes de las familias Apterodontidae y Loricariidae, mayoritariamente demersales y sedentarias. Con posterioridad a la desviación (26.02. - 02.03.14), se presentó una creciente del río ( $Q > 1.900 \text{ m}^3/\text{s}$ ), pasó por encima de la preatagüa e inundó el sector de *lecho seco*, objeto del rescate, entre Puente Tenche y Puente Capitanes, ca. 1,2 km de río. Durante este período y hasta el 08.03.14, la tasa de captura de peces disminuyó ostensiblemente. El rescate del período final reportado (09.03. - 17.03.14) superó el esfuerzo previo en más de 40% tanto de abundancia, como de biomasa y riqueza de especies. Este hecho subraya la resiliencia del sistema fluvial del Cauca.

<sup>17</sup> Embalse Jaguas, en el río Nare en el decenio 1980-90 y recientemente Porce IV, permiten afirmar esta posibilidad. De hecho, durante el rescate de peces mencionado, se observó al menos un campamento de mineros, aguas abajo de la descarga de los túneles de desviación (véase foto 3.).

Los derrubios juegan un papel importante en la activación de los raudales (véase mapa 2.), un biotopo conspicuo de estos dos tramos que aloja una biocenosis particular: perifiton y especies de peces iliófagas - herbívoras, principalmente de la familia Loricariidae. Estas especies están especialmente adaptadas a las exigentes condiciones de los raudales (estrategia reproductiva K<sup>18</sup>): cuerpo protegido por corazas, labios provistos de ventosas para adherirse al substrato rocoso, hábito demersal, dieta iliófaga o basada en perifiton, esfuerzo reproductivo bajo (pocos huevos, < 100), cuidado parental de la progenie, territorialidad, período generacional largo (> 5 años), etc.

Los caudales reducidos del Cauca durante el estiaje permiten una permanencia más larga de los derrubios en el lecho fluvial, disminuirán el área de la sección del río y la profundidad, lo cual favorece la persistencia del raudal y consecuentemente la de los organismos que lo aprovechan<sup>19</sup>. Véanse fotos 4a. y 4b.



Foto 4. Derrubios de las quebradas El Pescado (A), margen derecha, km 3,8 y Los Rodriguez (B), margen derecha km 16,0 que permiten el estrechamiento recurrente del río Cauca y la consecuente activación de los raudales. Fotos Integral, sin fecha

<sup>18</sup> *Estrategia reproductiva r*: tipología de reproducción animal, aunque también se aplica a plantas vasculares, caracterizada por la producción de numerosos propágulos (semillas, huevos o juveniles...), con período de gestación corto, cuidado parental mínimo, período pre-reproductivo corto, altas tasas de mortalidad juvenil; e. g.: pastos, hierbas, ceibas, moscas, ratones, conejos. Es opuesta a: *estrategia reproductiva K*, caracterizada por la producción de pocos descendientes, largos períodos de gestación, alta inversión parental en juveniles, largos períodos pre-reproductivos y bajas tasas de mortalidad juvenil: e. g., aguacates, cocoteros, elefantes, delfines...

<sup>19</sup> Las características y ecología de los raudales del Cauca entre el sitio de presa Ituango y Puerto Valdivia y su importancia como barreras al flujo genético de las especies reófilas se pueden ver en capítulo 4.4 *Caracterización de los raudales de la cuenca media del río Cauca* del informe Ictiofauna\_Pesca\_Cauca\_Feb\_2014.pdf

## IV Hipótesis derivadas del diagrama causal del llenado de Ituango

El diagrama causal (fig. 2.), se basa en relaciones realistas pero hipotéticas de como puede funcionar el sistema Cauca aguas abajo de la presa. Algunas hipótesis son triviales y no ameritan mayor discusión, mientras que para otras se requiere sustentación con datos, inferidos del comportamiento del río, en fases contrastantes de estiaje y creciente, en los mismos tramos sujetos a la alteración hidrológica. A continuación se formulan en forma explícita tres hipótesis nulas<sup>20</sup> fundamentales.

1. Los *eventos de sequía*<sup>21</sup> en el río Cauca, aguas abajo de la presa Ituango son regulares, frecuentes, de baja intensidad, larga duración, uniformes a lo largo del tramo bajo del río.
2. Las intercambios de materia y energía entre los biotopos terrestres y los acuáticos en el río Cauca, aguas abajo de la presa Ituango, no presentan diferencias cualitativas ni cuantitativas de un tramo a otro.
3. Las comunidades de organismos acuáticos del Cauca, aguas abajo de la presa Ituango, no presentan diferencias en composición (especies y ecotipos) ni en diversidad (riqueza y abundancia) de un tramo a otro ni con los afluentes; estas comunidades no toleran los eventos de sequía y tienen una baja capacidad de recuperación.

La verificación de este conjunto de hipótesis responde a los interrogantes planteados en la metodología: i. e.: identificación y evaluación de los atributos hidrológicos, ecológicos y organizmicos del sistema Cauca, abajo de la presa Ituango, involucrados en el proceso de llenado. Este análisis contempla tres evaluaciones independientes pero relacionadas: (i) análisis de los eventos de sequía, (ii) valoración de la heterogeneidad física del sistema Cauca y (iii) caracterización biótica de las comunidades organizmicas.

### Análisis de los eventos de sequía

El análisis de los eventos de sequía (descensos recurrentes la profundidad del río Cauca, de duración e intensidad variables) se llevó a cabo en el sistema fluvial del Cauca medio (La Virginia - Caucasia)<sup>22</sup> que incluye el primer sector de la planicie aluvial del Magdalena. Hasta la fecha los análisis se han limitado al comportamiento de los caudales aguas abajo de la presa Ituango, sin considerar otros atributos del cambio hidrológico. En el presente análisis se enfatizan las variaciones espaciales de la lámina de agua - a lo largo del río, aguas abajo de la presa- y temporales -dentro de un año y de un año a otro-, véase fig. 4. La lámina es función por supuesto del caudal, pero lo es además de la amplitud del lecho fluvial, de su pendiente longitudinal, de los materiales que conforman éste y las paredes y orillas del canal fluvial. Caudales diferentes no implican necesariamente diferencias en lámina y viceversa, láminas diferentes pueden derivarse de una misma condición de caudal en el mismo punto en años diferentes.

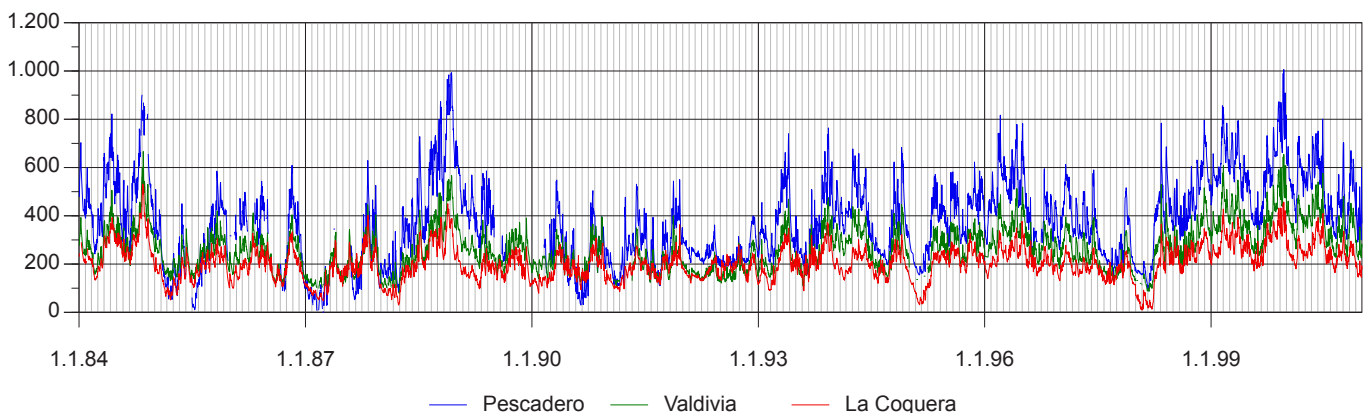


Fig. 4. Variación de niveles diarios (cm de mira) del río Cauca en Pescadero (aguas arriba de la presa) y en Puerto Valdivia y La Coquera, aguas abajo. Aunque el caudal aumenta río abajo, la magnitud de las fluctuaciones de nivel disminuye, a medida que el lecho fluvial y el valle se amplían. Puntos intermedios, sin registros o no graficados pueden tener varianzas y medias diferentes; véase también figura 6.

<sup>20</sup> Las hipótesis nula planteadas (y las alternas implícitas) son contra- intuitivas por el conocimiento que se tiene del río, pero no son heurísticas; pueden ser validadas o descartadas por la acumulación de datos de observaciones en el sistema fluvial.

<sup>21</sup> Un *evento de sequía* se define aquí como una *reducción de la lámina de agua en un punto del río, por debajo del valor medio multianual en ese sitio* y es el objeto de análisis. Se excluyen del análisis la causa primaria, la *sequía climática* (disminución de las lluvias y escorrentía en la cuenca aferente al sitio) y la *sequía edáfica* asociada (baja capacidad de retención de agua o drenaje excesivo del suelo determinada por su espesor, composición, pendiente...) de las vertientes del valle (tramos 1° y 2°). La razón fundamental de la exclusión es que en los tramos 1°, 2° y 3° abajo de la presa, la *sequía es inducida* por la retención de caudal para llenar el embalse, es decir es, durante este proceso, independiente de las otras dos.

<sup>22</sup> El análisis se llevó a cabo sólo para dos estaciones limnigráficas: H6, Puente Pescadero, 29,9 km aguas arriba de la presa Ituango y H3, La Coquera, aguas abajo de la desembocadura del río Man en el Cauca, a 142,8 km de la presa. Véase mapa 1.

Las sequías y las crecientes son eventos naturales, recurrentes en los ríos tropicales y de la zona templada; varían de un año a otro y de un punto a otro; se tipifican por:

- magnitud (intensidad)
- duración (cuánto)
- oportunidad (cuándo)
- ubicación (dónde)

La sequía se define como la *persistencia de cualquier nivel inferior al nivel medio diario multianual del río en una localidad dada*. Se analizaron las estaciones H6 Pescadero<sup>23</sup> y H3 La Coquera; los parámetros de análisis se presentan en la tabla 2. En cada caso el rango se dividió en clases de intensidad (15 en Pescadero y 20 en La Coquera); las de Pescadero son más amplias (25 cm) que las de La Coquera (10 cm) en atención a que, en la planicie, pequeñas variaciones de intensidad afectan áreas considerables.

Tabla 2. Parámetros para análisis de eventos de sequía en el río Cauca, abajo de presa Ituango

estación	longitud de registro (años)	nivel de sequía = nivel medio multianual (cm)	nivel mínimo histórico (cm)	intensidad de sequía (cm de mira)		n° clases de intensidad
				mínima	máxima	
H6 Pescadero	1984-2000 (16)	375	1	n < 25	n ≤ 375	15
H3 La Coquera	1984-2000 (16)	203	10	n < 10	n ≤ 203	20

Las duraciones de cada evento se midieron como el número de días consecutivos en los que el nivel medido fue inferior al límite inferior de la clase de sequía correspondiente. Un evento terminó cuando el nivel superó el nivel medio multianual.

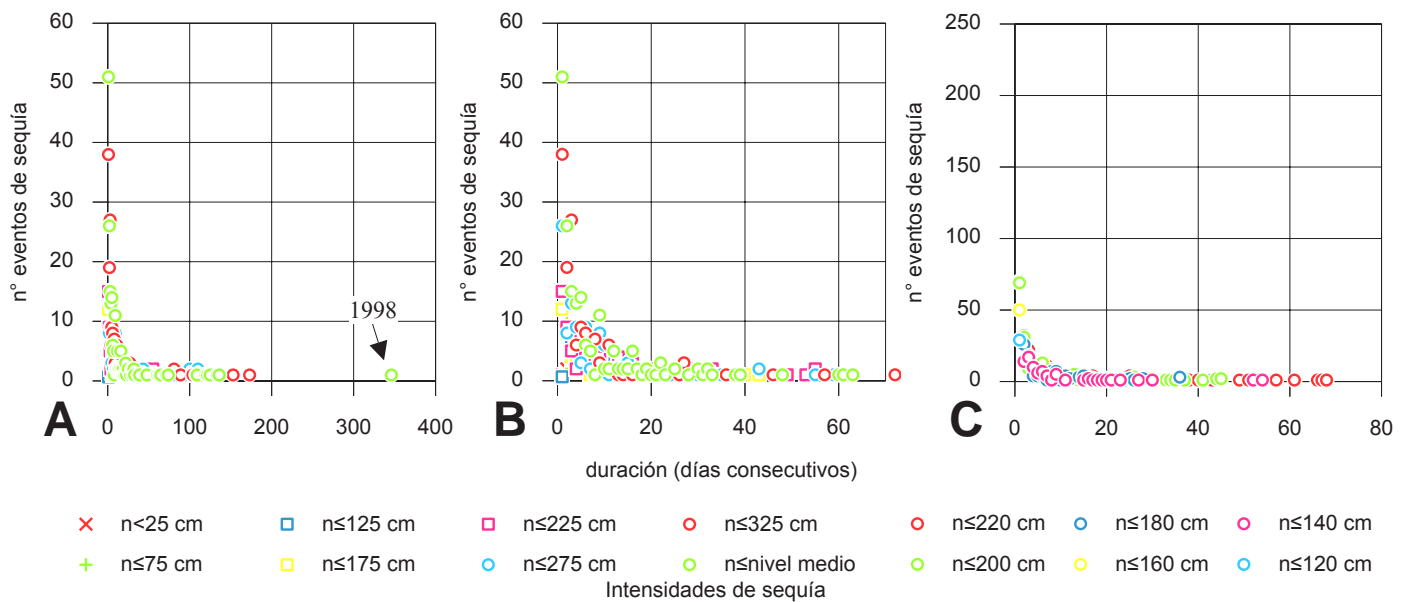


Figura 5. Duración de eventos de sequía de diferente intensidad, período 1984-2000, en dos estaciones del río Cauca: gráfica A, todos los eventos en estación Pescadero; B sólo eventos de menos de 9 semanas de duración; C eventos en estación La Coquera de menos de 70 días de duración (10 semanas).

Los resultados se presentan en las gráficas de la figura 5. La gráfica A muestra todos los eventos de sequía en Pescadero, incluso el del año 1998 que presentó 346 días consecutivos por debajo del nivel medio (n ≤ 375 cm); la gráfica B, también de Pescadero, sólo muestra aquellos eventos cuya duración máxima fue de 63 días (9 semanas); este rango de duraciones incluye para todas las clases de intensidad más del 92,5% de los eventos y en algunas de ellas el 100%. La gráfica C muestra los eventos de La Coquera cuya duración es menor de 10 semanas (70 días) en incluye el 96% de todos los eventos. En las dos estaciones predominan los eventos de corta duración, menos de 20 días y de mediana intensidad, niveles intermedios entre sequías extremas y valores cercanos al nivel medio de la estación. Como es de esperar, las intensidades absolutas, i. e. en términos de lámina, son menores en la estación La Coquera, ubicada al comienzo de la planicie aluvial.

<sup>23</sup> Un nivel mínimo extremo de 1 cm ocurrió el 26.03.1987; aunque sospechoso, no se excluyó del análisis pues corresponde con valores bajos en la misma fecha -aunque no necesariamente los mínimos- en otras estaciones aguas abajo y porque los niveles de los días anteriores y posteriores a este mínimo también fueron bajos.

La estacionalidad<sup>24</sup> de los eventos de sequía se analizó de una manera diferente: la pregunta es cuándo, en qué época del año se presentan los eventos de sequía. Una inspección rápida de la figura 4. permite concluir que tanto las sequías, como las crecientes, pueden ocurrir en cualquier época del año, aunque se puede afirmar también que el río tiene unos períodos recurrentes de aguas altas y otros de aguas bajas. Esta ambigüedad subraya el hecho de que los eventos son impredecibles, tanto para nosotros los seres humanos que guardamos registros, los analizamos y podemos hacer inferencias a veces acertadas, como para los organismos que no tienen estas posibilidades. Por esta razón es conveniente establecer la incertidumbre de la ocurrencia de los eventos de sequía. El análisis se realizó con base en el concepto de *regularidad temporal*<sup>25</sup> de un evento recurrente, en este caso es la sequía, pero se puede aplicar igualmente para las crecientes o fenómenos asociados, e. g., migraciones de aves, peces, insectos... o fenologías (foliación, floración, fructificación, etc.) y para cualquier tipo de evento recurrente, independiente del periodo de recurrencia y de la causa del evento, e. g., epidemias infecciosas, levantamientos populares, promociones comerciales, etc.

$$S = 1 - [R_{real}/R_{max}]$$

$$R_{real} = -\sum p_i \log p_i$$

donde:

$S$  = estacionalidad  
 $R_{real}$  = regularidad temporal medida  
 $R_{max}$  = log [longitud de serie en años]  
 $p_i$  = [número de veces en período que el evento tiene valor extremo en unidad temporal i-ésima]/período

Los cálculos se hicieron tomando el mes como *unidad temporal* de análisis, aunque se pueden hacer también con períodos más cortos, e. g. décadas o semanas o más largos, e. g., trimestres. Aunque la serie disponible es corta, 17 años, se separó en años húmedos (con nivel medio anual > nivel medio multianual) y años secos (con nivel medio anual < nivel medio multianual). Los resultados se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Evaluación de estacionalidad de eventos de sequía en dos estaciones del río Cauca

parámetro	unidad	Pescadero		La Coquera	
		1984- 2000		1984- 2000	
		seco	húmedo	seco	húmedo
media de promedios anuales	cm de mira	294,2	462,3	181,5	241,5
número de años en período	años	9	8	11	6
desviación standard	cm de mira	59,7	70,4	10,7	34,4
probabilidad de duración de niveles	-	0,75	0,24	0,8	0,2
promedio anual mínimo	cm de mira	206,1	393,8	165,3	207,4
promedio anual máximo	cm de mira	367,9	593,8	200,7	290,4
mínima mensual	cm de mira	53,0		34,0	
máxima mensual	cm de mira		815,0		410,0
longitud de serie	años	17	17	17	17
Regularidad temporal real	-	0,6	0,8	0,7	0,8
Regularidad temporal máxima	-	1,2	1,2	1,2	1,2
sequía media	meses	4,9		3,6	
sequía máxima	meses	12,0		8,0	
estacionalidad	-	0,5	0,3	0,4	0,3

Las sequías del río Cauca son de estacionalidad poco marcada ( $S \leq 0,5$ ), i. e., tienden a ocurrir cualquier época del año. Los años húmedos son más uniformes. La Coquera, localizada al comienzo de la planicie de inundación, no refleja el efecto regulador de ésta y presenta una mayor uniformidad que Pescadero; no obstante, los eventos de sequía tienen una duración menor. Es posible que en años recientes (desde 2000 a la fecha, período no analizado), como consecuencia del cambio climático y del deterioro de la planicie superior del Cauca (Salvajina - La Virginia), se acentúe la incertidumbre sobre la estacionalidad de las sequías ( $S \rightarrow 0$ ).

Es claro que conviene ampliar el análisis a otras estaciones aguas arriba y abajo de Pescadero y analizar conjuntamente y por separado los registros acumulados desde 2000.

<sup>24</sup> La estacionalidad se refiere a la recurrencia en una misma época del año de eventos de sequía (o de inundación). Los organismos pueden ajustar sus ciclos de vida (reproducción, mantenimiento, crecimiento...) a la época en que ocurren los eventos hidrológicos.

<sup>25</sup> Obrdlik, P. & L. C. García Lozano. 1992. Spatio-temporal distribution of macrozoobenthos abundance in the Upper Rhine alluvial floodplain. Arch. Hydrobiol. 124(2):205-224.

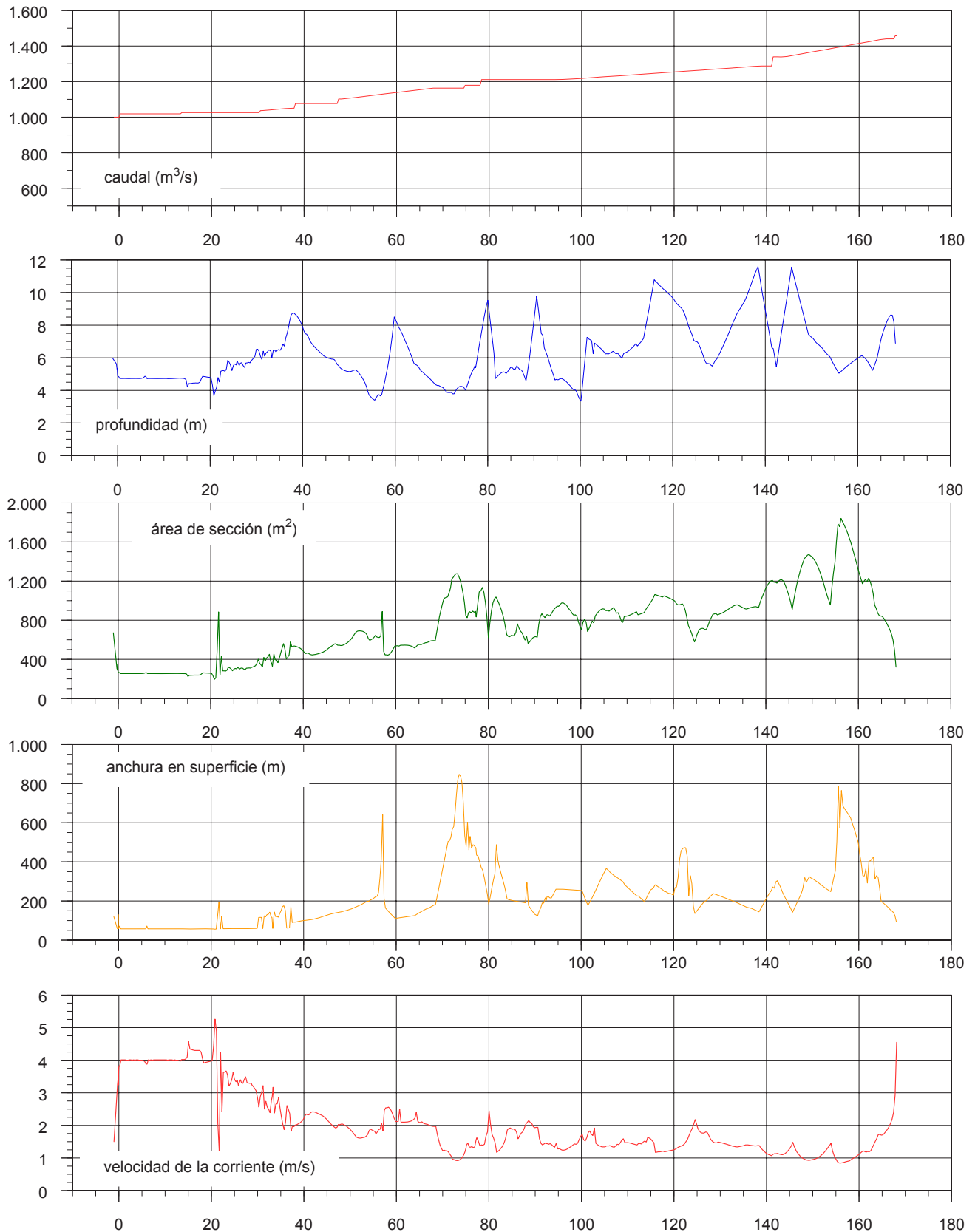


Fig. 6. Variación espacial de los parámetros de la conductividad hidráulica del río Cauca medio-bajo. Cada punto a lo largo del río, abajo del embalse, es un hiperespacio (espacio n-dimensional) único, aprovechado por diversas especies en competencia por recursos físicos y biológicos igualmente variables



## Heterogeneidad física del sistema Cauca abajo de la presa Ituango

Las propiedades y características de los hábitats acuáticos y anfibios de un sistema fluvial dependen, por supuesto, de los cambios en calidad y cantidad de agua de un punto a otro y de un momento a otro. El caudal, sin duda es un buen indicador de los cambios cuantitativos, es una función monótona decreciente con la altitud y creciente con la distancia a un punto dado alto en el gradiente altitudinal. Sin embargo, la dinámica y heterogeneidad ecológica a lo largo de un río pueden ser mejor caracterizadas con otros atributos del comportamiento hidrológico: profundidad (lámina de agua), área de la sección fluvial, velocidad de la corriente, pendiente longitudinal del lecho, radio hidráulico, rugosidad del canal, puesto que estos atributos son afines a las demandas que el medio impone a los organismos acuáticos: v. gr., nado contra corriente; escape de depredadores; búsqueda y competencia por alimento, pareja o sitios de anidación; defensa de refugio y territorio...

La multiplicidad de hábitats que conforman los biótopos y paisajes del sistema fluvial del Cauca son el resultado de la interacción de las magnitudes de estos atributos -agrupados en la ecuación de conductividad hidráulica- y su comportamiento temporal (frecuencia, duración y estacionalidad). Los conjuntos de condiciones así definidas son los factores de selección natural que dinamizan la adaptación de las especies (cambios en frecuencias genéticas intergeneracionales)<sup>26</sup>. En la tabla 4. se enuncia la ecuación de la conductividad hidráulica, se definen en forma simple sus términos y se plantean las posibilidades técnicas de manejo.

Tabla 4. Términos de la conductividad hidráulica y posibilidades de manejo [ $Q = AV = cAR^{2/3}S^{1/2} = KS^{1/2}$ ]

símbolo	significado	posibilidades de manejo
$K$	conductividad hidráulica	controlable mediante manejo de uno o más términos (esta tabla)
$Q$	caudal saliente de embalse	control opcional durante llenado vía descargas a diferentes niveles
$A$	área de sección fluvial	controlable en tramos cortos críticos
$V$	velocidad de la corriente	controlable al reducir área
$R$	radio hidráulico	controlable al reducir área o aumentar el perímetro mojado
$S$	pendiente longitudinal del río	no controlable, puede sufrir cambios recurrentes por agradación o degradación
$c$	coeficiente de rugosidad del canal natural del río	no controlable a corto plazo

Las especies de comunidades acuáticas (plantas vasculares terrestres, anfibias y acuáticas, fito- y zooplancton, perifiton, bentos, peces...) responden a cambios espaciales y temporales de sus hábitats físicos mediante inversión energética diferencial en crecimiento, reproducción o mantenimiento y ésta puede ser genéticamente o fenotípicamente determinada (fisiología, comportamiento...). Como se ha mencionado reiterativamente, la sequía se manifiesta fundamentalmente como una reducción temporal de lámina de agua y consecuentemente del área de la sección fluvial, del perímetro húmedo y de la velocidad del agua. Las sequías son en general de corta duración días o semanas y de intensidad baja. Los eventos extremos (sequías muy intensas y muy prolongadas) son raros.

La figura 6., p. 15, presenta las variaciones de estos parámetros a lo largo del río Cauca desde el sitio de presa hasta la confluencia del Cauca y el Nechí<sup>27</sup>. Las condiciones de partida son las de caudal medio multianual en la estación Pescadero  $\approx 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$  y sus incrementos aguas abajo por los aportes de los tributarios. Dos aspectos merecen ser subrayados aquí: (i) de una parte las limitaciones del caudal para sintetizar la complejidad de los hábitats, biotopos y paisajes del sistema fluvial y (ii) la altísima heterogeneidad física de todos los sectores del río. Esta heterogeneidad se amplifica aún más si se considera la varianza temporal<sup>28</sup>.

<sup>26</sup> La teoría de la adaptación de múltiples especies que compiten en ambientes cambiantes fue desarrollada por R. Levins a mediados del siglo XX. Su enfoque da respuesta a la pregunta de cómo es posible para un organismo adaptarse a un ambiente espacialmente diverso sujeto a fluctuaciones recurrentes, con períodos que pueden ser menores, iguales o mayores que la vida media del organismo en cuestión. De su análisis se derivan predicciones acerca de los mecanismos genéticos (cambios cíclicos y recurrentes en la frecuencia de genes en la población) o fenotípicos (respuestas anatómicas, fisiológicas o de comportamiento inducidas por los cambios ambientales) y por ende a la estructura de las comunidades que habitan dichos ambientes. Véase, e. g.:

- Richard Levins. 1962. Theory of fitnesses in a heterogeneous environment, I. The fitness set and adaptive function. *American Naturalist* 96:361-78.

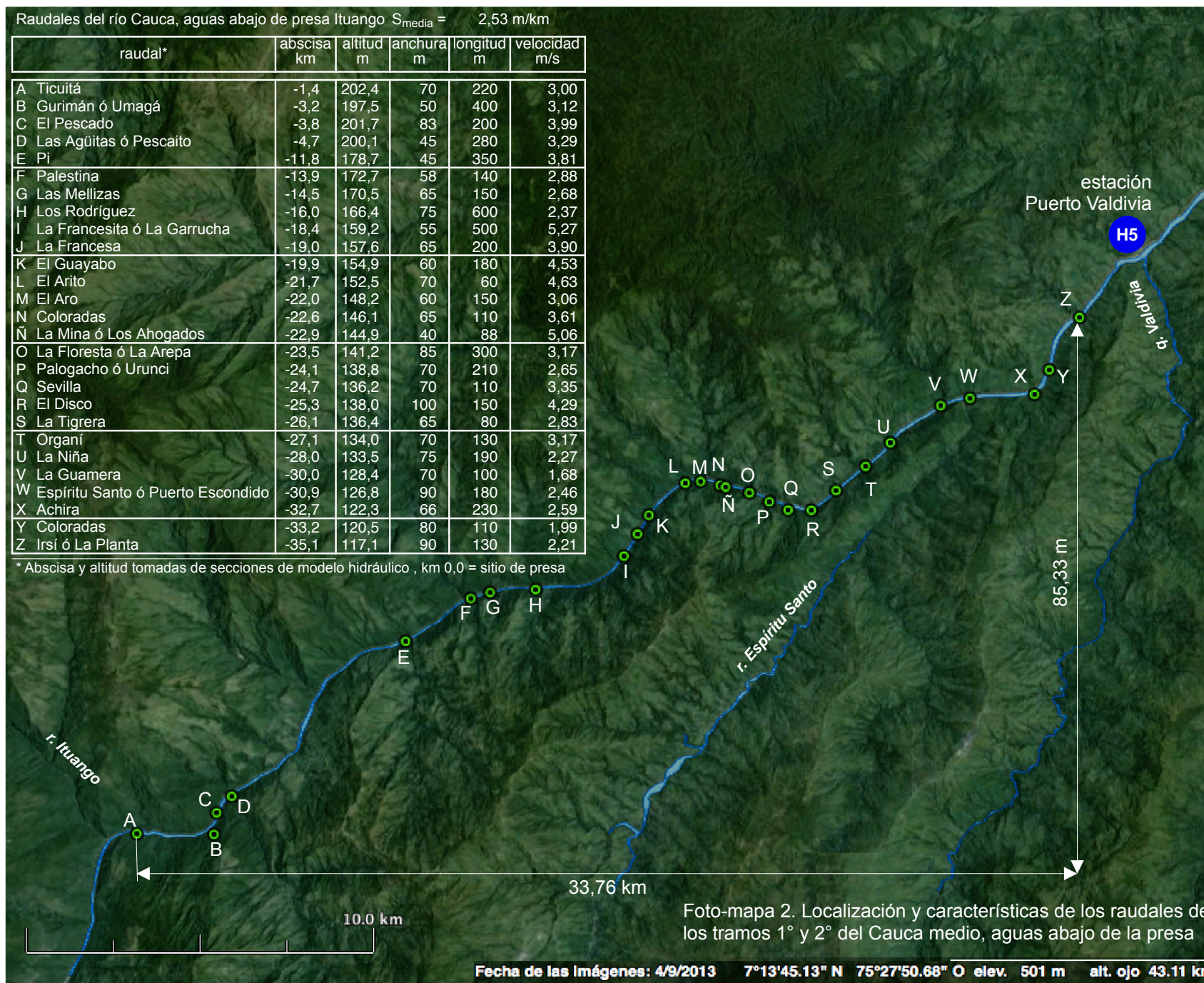
- Richard Levins. 1968. *Evolution in changing environments*. Princeton University Press. Princeton, New Jersey. 132 pp. ISBN: 9780691080628

<sup>27</sup> Las gráficas se confeccionaron con los datos, suministrados por Consorcio Generación Ituango Integral-Solingral, del modelo hidráulico y de las secciones transversales del río levantadas para los estudios y diseños del proyecto hidroeléctrico, desde el sitio de presa hasta la estación hidrométrica Margento (H2), aguas abajo de Caucasia. Para el caudal, los valores intermedios -entre estaciones hidrométricas- son interpolaciones.

<sup>28</sup> Las metodologías más recientes de definición de reglas de operación de obras hidráulicas (embalses, redes de canales de riego o drenaje, trasvasos, esclusas de navegación...), tanto en el trópico, como en la zona templada, se basan primordialmente en el conocimiento de los características de los hábitats físicos de las especies. Véase e. g.:

N Lamouroux, JM Olivier, H Persat, MC Pouilly, YS Souchon, B Statzner. 1999. Predicting community characteristics from habitat conditions: fluvial fish and hydraulics. *Freshwater Biology* 42 (2), 275-299

M Pouilly, F Lino, JG Bretenoux, C Rosales. 2003. Dietary-morphological relationships in a fish assemblage of the Bolivian Amazonian floodplain. *Journal of Fish Biology* 62 (5), 1137-1158.



Como se indicó anteriormente, en cada punto del río, el nivel -y las variables hidrológicas y ecológicas a él asociadas- son el resultado de una lámina que yace sobre un fondo agradado durante el estiaje previo y que será degradado en la creciente siguiente. Esta afirmación, evidente para el tramo 3°, lo es también para los sectores de menor pendiente -los remansos- de los tramos 1° y 2°. Por esta razón, el caudal no es un buen indicador de las características de los biotopos ni de las necesidades de las biocenosis.

La tabla 4.<sup>29</sup> sintetiza las relaciones entre los procesos ecológicos asociados a la sequía en la planicie aluvial del Magdalena, de la cual el sector bajo del Cauca aquí analizado hace parte. Cabe anotar que varios de los procesos enunciados en la tabla 5., desarrollados en la planicie aluvial también ocurren en los tramos entallados del río, i. e., los tramos 1° y 2°, aunque las interacciones no sean bien conocidas<sup>30</sup>. El más importante de estos procesos y de gran significado para el evento de sequía a ser inducido por el llenado del embalse, es el de activación de los raudales.

Tabla 5. Hábitats, eventos ecológicos, uso de recursos acoplados a eventos de sequía

Eventos del río y la planicie asociados a limnofase (pulso de sequía)	atributo*					
	F	I	T	R	A	S
flujo predominante desde la planicie hacia el río						
estabilidad de bancos y orillares y exposición de sedimentos en vegas, islas y planicie aluvial		1			1	
floración-fructificación de plantas vasculares terrestres (producción de propágulos)						
colonización de sedimentos expuestos por vegetación pionera herbácea y leñosa	1		1	1	1	1
actividad de herbívoros terrestres (mamíferos, insectos) y sus depredadores (carnívoros, carroñeros, insectívoros)		1			1	1
incrementos de: temperatura del agua, tasas de descomposición de materia orgánica, concentración de nutrientes, productividad primaria en remansos, charcas y pozos de orillas, vegas y lagos de la planicie (ciénagas y madrevejas) y disminución de oxígeno disuelto en todos los cuerpos de agua		1			1	
iniciación de migraciones de peces desde los lagos de planicie hacia el río		1		1		1
aumento de las concentraciones de carbono orgánico particulado en el río		1				1
fragmentación de los hábitats acuáticos de orillas, vegas y planicie, reemplazo de comunidades reófilas por comunidades limnéticas, particularmente invertebrados acuáticos y sus depredadores (otros invertebrados, peces, anfibios, aves...)		1	1		1	
aumento de los procesos extractivos: pesca, caza, leñateo, extracción de madera... minería de aluvión, extracción de materiales	1		-1		1	
establecimiento o expansión de explotaciones agropecuarias y de asentamientos nucleados en la planicie y en fase terrestre de hábitats anfibios (vegas, playones...)	-1	1	1	1		1

\* F = frecuencia I = intensidad T = tensión R = recurrencia A = amplitud S = estacionalidad 1 = correlación positiva -1 correlación negativa Estos parámetros para caracterizar la dinámica de las planicies aluviales en el trópico americano fueron acuñados por J. J. Neiff. 1990. Ideas para la interpretación ecológica del Paraná. *Interciencia*, 15(6):424-441 y Neiff, J. J., M. H. Iriondo, & R. Carignan. 1994. Large tropical South American wetlands: an overview. pp 156-165, en: G. L. Link & R. J. Naiman, compiladores, *Proceedings of the international workshop on the ecology and management of aquatic-terrestrial ecotones*. UNESCO, MAB, IHP, Center for Streamside Studies-University of Washington. Seattle. February 14-19, 1994. Su descripción y su uso para comparar sistemas fluviales se encuentran en: García Lozano, L. C. y C. M. Cardona Londoño. 1996. *Importancia ecológica del régimen pulsátil del río Magdalena*.

### Dinámica de activación de raudales en el río Cauca medio-bajo

En el foto-mapa 2., página 17, básicamente los tramos 1° torrencial y 2° de remansos y rápidos, es evidente que los raudales se forman en las bocas de las quebradas, en donde se acumulan los materiales de los derrubios. Esta observación es corroborada en el informe integrado de estudios ictiológicos del proyecto hidroeléctrico Ituango 2004-2013, preparado a comienzos del presente año<sup>31</sup>. Los alineamientos de las quebradas coinciden con fallas superficiales de la roca que indudablemente continúan al llegar al lecho del Cauca y presentan los cambios bruscos de pendiente que dan origen al raudal. Los derrubios contribuyen con material para estrechar la sección del río Cauca.

El estudio citado hace referencia a la edad de los raudales (menos de 10 años en algunos casos y hasta 50+ en otros), información suministrada por baquianos y pescadores. Sin cuestionar estos datos, se propone el siguiente esquema de activación de los raudales:

<sup>29</sup> García Lozano, L. C. y C. M. Cardona Londoño. 1996. *Importancia ecológica del régimen pulsátil del río Magdalena*.

<sup>30</sup> La pendiente del lecho, su estructura rocosa poco erosionable y la estrechez del valle fluvial impiden la formación de vegas y orillares en los tramos 1° y 2°; esta condición limita aún más las posibilidades de intercambios de materia y energía del río hacia las vertientes, a diferencia de otros sectores del Cauca medio, e. g., el tramo Bolombolo - Santafé de Antioquia.

<sup>31</sup> Véase: Comunidades de peces en la cuenca media y baja del río Cauca en el área de influencia del proyecto hidroeléctrico Ituango. Estudios 2006-2013. Capítulo 4.4 *Caracterización de los raudales de la cuenca media del río Cauca*. Informe Ictiofauna\_Pesca\_Cauca\_Feb\_2014.pdf. EPM, Consorcio Generación Ituango Integral - Solingral. 230 pp, sin numerar.

- los sitios aptos o susceptibles de formar un raudal han estado ahí siempre (desde que el Cauca corre en dirección NE)
- en estos sitios resistentes a la erosión (todo el lecho es una concavidad rocosa, se ve en los tramos “secos” aguas abajo de la ataguía) se produce muy poco material de arrastre, éste proviene de los derrubios de las quebradas de las dos márgenes, su acumulación origina el estrechamiento temporal de la sección, con el consecuente aumento de la velocidad de la corriente. Es la razón por la cual en todos los idiomas occidentales es esta propiedad la que da el nombre al fenómeno: *raudo* significa *muy veloz* en castellano.
- los aportes de derrubios son eventos recurrentes, causados por episodios de lluvias torrenciales en la cuenca de la quebrada afluente; el río Cauca transporta estos materiales pero éstos son repuestos periódicamente y el estrechamiento persiste.

Los materiales aportados por las quebradas son, como lo subraya el informe citado, de diferentes tamaños: desde arenas gruesas y gravas hasta rocas y bloques. Todos ellos son sustrato para las formas epilíticas y epipélicas de perifiton, cuya productividad es mayor que la del fitoplancton en los ríos de montaña neotropicales, incluyendo el Cauca<sup>32</sup>.

El perifiton epilítico y epipélico es el principal alimento de no menos de 35 especies de Loricariidae, 15 de las cuales han sido reportadas por Integral-EPM para el Cauca medio, incluso dos de ellas sólo en este tramo del río<sup>33</sup>. La mayoría de las especies de Loricariidae son demersales, sedentarias, no migratorias, tienen un ciclo vital largo (> 4 años), comparado con otras especies de peces de tamaño similar, exhiben cuidado parental de la progenie y sus tasas de esfuerzo reproductivo son bajas. Es decir su estrategia reproductiva es *K*, a diferencia de la mayoría de las especies del sistema Cauca que son estrategia *r*. Los numerosos raudales del Cauca medio, descritos en detalle en el informe consolidado citado, constituyen un biótomo importante del río Cauca aguas abajo de la presa Ituango. La biocenosis perifiton-loricariidos utiliza ampliamente éste biótomo.

Durante la fase de llenado del embalse, las menores profundidades del río Cauca disminuirán el área de sustrato rocoso de las márgenes, posiblemente poco utilizado por los loricariidos que tienen hábitos demersales o bentipelágicos; pero disminuirá la abrasión y aumentará el crecimiento de perifiton sobre los materiales aportados por las quebradas (derrubios y sedimentos); éstos residirán un tiempo más largo en cada raudal. En suma, el biótomo y la biocenosis se verán favorecidos durante la fase de llenado.



Foto 5. Condiciones para la reactivación de raudales en el río Cauca medio. A. derrubio a media ladera durante el estiaje; las altas pendientes facilitan el transporte hacia el lecho fluvial, el cual puede permanecer in situ durante semanas, hasta que una creciente del Cauca lo transporte aguas abajo. B. pared casi vertical de la margen izquierda del río aguas arriba de la descarga de los túneles de desviación, en la boca del río Ituango; las rocas son resistentes a la erosión. Nótese la acumulación de grandes bloques y cantos al pie del talud rocoso. La mira anclada en la roca (flecha roja) tiene una longitud de 3 m.

<sup>32</sup> Sobre este tema véase el capítulo 5° de AMBIENTEC Ltda. 1984. Proyecto hidroeléctrico de Cañafisto. Estudio ecológico /ecología acuática. Bogotá D. E. Interconexión Eléctrica S. A., Medellín, 405 pp.

<sup>33</sup> Las especies exclusivas son: *Hypostomus hondae* y *Squaliforma tenuicauda*. Véase: Tabla 1. Especies reportadas, endémicas e introducidas para la cuenca del río Cauca a partir de información secundaria y capturas realizadas en agosto de 2006 y enero de 2007: Ictiofauna-Anexo2\_Tablas.doc: ANX\_4-14-Ictiofauna: EIA Ituango. 2007.

### Características bióticas de las comunidades del sistema Cauca, abajo de la presa Ituango

Los habitats físicos del sistema fluvial del Cauca, aguas abajo de la presa Ituango son heterogéneos y muy dinámicos, no sólo los de la planicie aluvial sino también, aunque en menor grado, los de los tramos entallados. Los flujos de materiales y de energía en los tramos 1° y 2° son, en términos generales, unidireccionales desde los componentes terrestres: además del agua de escorrentía y los escasos lixiviados de los suelos esqueléticos y oligotróficos de las vertientes, los bosques caducifolios, relativamente bien conservados del tramo 1°, aportan una cantidad considerable de mantillo<sup>34</sup> que el río fragmenta y descompone o transporta y posiblemente deposita en las orillas de los sectores de menor pendiente; este aporte no ha sido cuantificado para este tramo del Cauca.

Las corrientes de los afluentes y del río Cauca mismo, son un mecanismo de dispersión de propágulos de plantas terrestres, sin embargo, no se ha confeccionado una lista de especies hidrócoras de estos bosques. Igualmente, varias especies de peces de la familia Characidae, particularmente del género *Brycon*, poseen hábitos alimenticios omnívoros y consumen regularmente pequeños frutos que caen a la corriente; los estudios ictiológicos adelantados por EPM y sus consultores han reportado restos vegetales, incluso partes de semillas, en el tracto digestivo de estas especies; no obstante, no hay reportes directos de endozoocoria<sup>35</sup>.

Los numerosos afluentes de los tramos 1° y 2° podrían participar en flujos bidireccionales, aunque la evidencia de estos es ambigua. EPM<sup>36</sup> ha investigado la existencia de sitios de desove de peces reófilos que habitan los sectores bajos del río, en las partes altas, incluso de dos tributarios aguas abajo del sitio de presa: el río Ituango, aunque mejor conservado parece ser muy pobre en ictiofauna en general y en estadios juveniles de especies migratorias en particular; por el contrario, el río Espíritu Santo, afectado por minería de oro y avanzada deforestación, ha rendido mejores resultados en cuanto de riqueza y abundancia de adultos y huevos, larvas y otros estadios tempranos.

Este análisis precede la conformación de una base de datos estructurada de los registros y colecciones de casi 10 años de investigaciones ecológicas en el sistema Cauca, asociadas al PH-Ituango. Una tabla compilada para el EIA, terminado en 2007, lista ca. 183 especies (incluye un número impreciso -14 a 19- de especies introducidas de otras regiones biogeográficas, entre 6 y 10 de ellas de la familia Cichlidae y sus híbridos, no reportadas como tales) para todo el río desde Salvajina hasta la confluencia con el Magdalena en la Depresión Momposina; registra si las especies se han encontrado en los tramos superior, medio o inferior del río. No contiene campos sobre hábitos, dietas, etc. Los únicos datos adicionales son: endemismos, procedencia y relaciones biogeográficas y status de conservación, éstos últimos están incompletos, son ambiguos o contradictorios y están en revisión.

Con base en otros documentos: EIA de Cañafisto, citado anteriormente, el informe consolidado de estudios ictiológicos de Integral-EPM y referencias bibliográficas externas, se confeccionó la tabla 6. con detalles bionómicos y ecológicos de 38 especies de peces del sector de interés para el llenado del embalse Ituango (véase apostilla <sup>36</sup>, p. 21).

Tabla 6. Características ecológicas de las principales especies de peces del sistema Cauca

especie	tenor		alimentación <sup>1,2</sup>						resiliencia (tiempo de generación años) <sup>2</sup>	vulnerabilidad % <sup>2</sup>	hábitus <sup>2</sup>				biotopo <sup>1</sup>				migraciones				
	abundancia <sup>1</sup>	biomasa <sup>1</sup>	nivel trófico <sup>2</sup>	detritos	perifiton	plantas	insectos	peces omnívoro			pelágico	bentopelágico	demersal	nectónico	raudales	remanos	río de llanura	ciénagas-caños	quebradas	subienda (S estiaje)	bajanza (B creciente)	post-S (transición)	post-B (transición)
<i>Ageneiosus pardalis</i>			3,9						1,4-4,4	41													
<i>Apteronotus magdalenensis</i>			3,5						¿?	57													
<i>Astyanax caucanus</i>	+		2,8						< 1,25	10													
<i>Astyanax fasciatus</i>			2,8						< 1,25	10													
<i>Brycon henni</i>			2,6						< 1,25	33													
<i>Brycon moorei</i>		+	2,5						1,4-4,4	43													
<i>Brycon sinuensis</i>			2,7						< 1,25	17													
<i>Curimata mivartii</i>			2,0						¿?	20													
<i>Cynopotamus magdalenae</i>			4,2						¿?	39													
<i>Cyphocharax magdalenae</i>	+		2,0						¿?	10													
<i>Ichthyoelephas longirostris</i>		+	2,0						1,4-4,4	49													
<i>Leporinus muyscorum</i>			2,1						1,4-4,4	32													

<sup>34</sup> Mantillo es el nombre genérico de material vegetal muerto producido continuamente por la vegetación: hojas, ramas, restos de flores y frutos, etc.

<sup>35</sup> Las sequías (climáticas) recurrentes, estacionales, inducen el ciclo defoliación-floración-fructificación-dispersión de propágulos, véase tab. 4., p. 16.

<sup>36</sup> Comunidades de peces en la cuenca media y baja del río Cauca en el área de influencia del proyecto hidroeléctrico Ituango. Estudios 2006-2013. Capítulo 4.2 Migración de peces en la cuenca media y baja del río Cauca

Tabla 6. Características ecológicas de las principales especies de peces del sistema Cauca

especie	tenor		alimentación <sup>1,2</sup>							resiliencia (tiempo de generación años) <sup>2</sup>	vulnerabilidad % <sup>2</sup>	hábitus <sup>2</sup>				biotopo <sup>1</sup>				migraciones					
	abundancia <sup>1</sup>	biomasa <sup>1</sup>	nivel trófico <sup>2</sup>	detritos	perifiton	plantas	insectos	peces	omnívoro			pelágico	bentopelágico	demersal	nectónico	raudales	remanos	río de llanura	ciénagas-caños	quebradas	subienda (S estiaje)	bajanza (B creciente)	post-S (transición)	post-B (transición)	
<i>Dasylicaria filamentosa</i>			2,0							4,5-14	22														
<i>Pimelodus blochii</i>			3,1							< 1,25	27														
<i>Pimelodus grosskopfii</i>	+	+	3,3							< 1,25	26														
<i>Plagioscion magdalenae</i>			4,5							1,4-4,4	39														
<i>Prochilodus magdalenae</i>		+	2,1							1,4-4,4	34														
<i>Pseudopimelodus bufonius</i>			3,7							1,4-4,4	20														
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>			4,4							1,4-4,4	53														
<i>Rhamdia quelen</i>			3,2							¿?	24														
<i>Roeboides dayi</i>	+		3,5							< 1,25	10														
<i>Salminus affinis</i>		+	3,0							< 1,25	10														
<i>Sorubim cuspicaudus</i>		+	4,3							1,4-4,4	56														
<i>Triportheus magdalenae</i>	+		2,8							¿?	13														
<i>Pimelodus clarias</i> <sup>3</sup>			3,0							1,4-4,4	38														
<i>Cordylancistrus daguae</i> <sup>3,4</sup>			2,3							< 1,25	10														
<i>Chaetostoma fischeri</i> <sup>3</sup>			2,0							¿?	16														
<i>Sternopygus macrurus</i> <sup>3</sup>			3,2							¿?	63														
<i>Apteronotus rostratus</i> <sup>3</sup>			3,3							¿?	14														
<i>Chaetostoma leucomelas</i>			2,1							¿?	10														
<i>Chaetostoma thomsoni</i>			2,2							¿?	10														
<i>Hemiancistrus wilsoni</i>			2,0							¿?	17														
<i>Hypostomus hondae</i>			2,0							¿?	33														
<i>Lasciancistrus caucanus</i>			2,0							¿?	19														
<i>Squaliforma tenuicauda</i>			2,0							¿?	31														
<i>Sturisoma panamense</i>			2,3							4,5-14	22														
<i>Sturisomatichthys leightoni</i>			2,4							¿?	12														
$\Sigma^5$				16	13	6	11	11	9				1	19	13	0	3	7	12	11	6	9	9	4	2

<sup>1</sup> INFORME Ictiofauna\_Pesca\_Cauca\_Feb\_2014. Cap 4.1 Composición y abundancia

<sup>2</sup> Síntesis de perfiles de especies en Fishbase

<sup>3</sup> Especies reportadas tanto en informe <sup>(1)</sup>, como en Ambientec Ltda. 1985. Proyecto hidroeléctrico de Cañafisto / Estudio ecológico: Informe final / Interconexión Eléctrica S. A. 310 pp. Medellín.

<sup>4</sup> Especie reportada <sup>(1)</sup> y <sup>(3)</sup>, como *Pseudoancistrus daguae*, sinónimo invalidado; comunicación personal 13.04.2014 de Dr. Emily Capuli (e.capuli@fin.ph) de FishBase Information and Research Group

<sup>5</sup> Especie reportada <sup>(1)</sup> como *Panaque gibbosus*, no está incluida en esta tabla, pues no corresponde con ninguna especie ni sinónimo en Fishbase. Consulta elevada a FishBase Information and Research Group.

Tabla 7. Abundancias y riquezas de especies en diferentes sectores del Cauca medio\*

Especie	río Cauca medio - bajo superior																		afluentes						síntesis											
	aguas arriba embalse		embalse			sector I torrencial					sector II remansos y rápidos			sector III planicie aluvial					río Ituango			río Espíritu Santo			Σ población	ubicuidad	fubicuidad									
	E1	E2	E3	E3.1	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	E19	E20	E21	E22	E23				E24								
<i>Ageneiosus pardalis</i>													3	15	11	14	23	21	55													142	7	0,28		
<i>Astyanax fasciatus</i>	12	218	3	4		1	3	1	26	42	44	7	8	347	922	900	133	87	21				4	4		3					2.790	21	0,84			
<i>Brycon henni</i>				3					5	2	2			5						23	50	21	30	8	7						156	11	0,44			
<i>Brycon moorei</i>	1	3			1				3	3	2					1			1					1	33						49	10	0,40			
<i>Brycon sinuensis</i>									1	2													1		15						20	5	0,20			
<i>Curimata mioartii</i>											1	5	4	28	18	8	7	1	4												77	10	0,40			
<i>Cynopotamus magdalenae</i>											5	1	10		34	24	10	5	100												2	191	9	0,36		
<i>Ichthyoelephas longirostris</i>			2		2		1		1	5			4	1	1			1					5	2							25	11	0,44			
<i>Leporinus muyscorum</i>			5		1			2		41	65	18	97	79	12	213	210	58	9	99				1	7		33					950	17	0,68		
<i>Pimelodus blochii</i>			8	29	1	1	2		4		7	41	21	20	42	5	46	28	33	20	54						3	92					457	19	0,76	
<i>Pimelodus grosskopfii</i>	93	130	7	9	8	4	25	13	12	122	59	130	92	10	111	69	98	66	139				6	2		130						1.335	23	0,92		
<i>Plagioscion magdalenae</i>																		1	1												6	8	3	0,12		
<i>Prochilodus magdalenae</i>	18	96	1	1	13	2	3	5	31	94	29	21	7	37	28	100	43	41	123				2	1	1	59					756	23	0,92			
<i>Pseudopimelodus bufonius</i>	16	35							1	2	6	3	7	2	11	8	15	5	7												5	123	14	0,56		
<i>Pseudoplatystoma magdaleniatum</i>										7	2	1	4	5	42	65	7	4	17												9	163	11	0,44		
<i>Rhamdia quelen</i>			1											1	3	5	15	10	1	2												38	8	0,32		
<i>Salminus affinis</i>	1								2					1		1	1	1	3												2	1	12	8	0,32	
<i>Sorubim cuspidatus</i>	1			1				1			19	4	5	39	34	247	79	10	15	65												76	596	14	0,56	
<i>Triportheus magdalenae</i>								1	1	1	73	146	15	52	62	179	94	61	31	106												2	41	865	15	0,60
<b>Σabundancia</b>	150	519	12	20	26	7	40	29	129	480	329	305	353	567	1.868	1.616	511	306	797	23	50	35	54	62	465						8.753					
<b>riqueza de especies</b>	8	9	4	7	5	3	8	7	12	14	9	11	15	15	14	15	16	13	16	1	1	6	9	6	14						19					
<b>f-riqueza</b>	0,42	0,47	0,21	0,37	0,26	0,16	0,42	0,37	0,63	0,74	0,47	0,58	0,79	0,79	0,74	0,79	0,84	0,68	0,84	0,05	0,05	0,32	0,47	0,32	0,74						1					
<b>f-abundancia</b>	<b>0,08</b>			<b>0,01</b>					<b>0,08</b>			<b>0,11</b>				<b>0,65</b>							<b>0,01</b>								<b>f-abundancia</b>					
<b>f-riqueza</b>	<b>0,58</b>			<b>0,47</b>					<b>0,84</b>			<b>0,79</b>				<b>0,95</b>							<b>0,32</b>								<b>f-riqueza</b>					

\* f = fracción, expresada sobre los totales reportados en esta tabla, no sobre valores absolutos desconocidos (para todo el río).

El número de especies es pequeño<sup>37</sup>, no obstante, esta muestra contiene información sobre el 64% de las especies reportadas para el Cauca medio y el 34% de las reportadas para el bajo Cauca por el EIA de PH-Ituango (Integral 2007)<sup>38</sup>, incluye todas las especies de mayor tenor en términos de abundancia y biomasa (marcadas con + en la tabla), especies de todas las familias reportadas, reófilas (de aguas corrientes) y limnéticas (de aguas quietas), migratorias y sedentarias; en suma, este conjunto parece ser representativo de las biocenosis del sistema Cauca medio.

Las dos fuentes de información resaltan la predominancia de especies omnívoras y las dietas iliófagas - herbívoras; sorprendentemente los piscívoros exclusivos son escasos (2 especies) aunque se sabe que algunas migraciones son inducidas por alimentación. De acuerdo con el EIA (Integral, 2007) la gran mayoría de las especies no tienen status de amenaza en el Libro rojo de peces dulceacuícolas<sup>39</sup>, [NT = 7, VU = 6, EN = 3, CR = 1; tabla 1 de EIA-PHI, Integral, 2007], no obstante se seleccionaron dos indicadores complementarios para establecer la capacidad de recuperación de las biocenosis del sistema Cauca aguas abajo de Ituango:

<sup>37</sup> La especie reportada en EIA Ituango (Integral, 2007) como *Panaque gibbosus*, Loricariidae, no está incluida en esta tabla, pues no corresponde con ninguna especie ni sinónimo en Fishbase. Consulta elevada a FishBase Information and Research Group.

<sup>38</sup> Es posible complementar esta tabla con datos para todas las especies reportadas en los tramos 1° a 3° en el informe consolidado Informe Ictiofauna\_Pesca\_Cauca\_Feb\_2014.pdf., sin embargo la compilación de esta lista toma bastante tiempo y no es seguro que provea información novedosa adicional.

<sup>39</sup> Mojica, J.I., C. Castellanos, S. Usma y R. Álvarez (eds.). 2002. Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Medio Ambiente. Bogotá. 286 pp. Edición utilizada por Integral (EIA, 2007); edición de 2012 no ha sido consultada. Orden ascendente de amenaza: NT = cuasi-amenazada, VU = vulnerable, EN = en peligro, CR = amenaza crítica. Ver definiciones y criterios en IUCN

(i) **resiliencia poblacional**<sup>40</sup>, se utiliza el tiempo medio de generación (*mean doubling population time*), es una propiedad intrínseca de la especie depende de la fecundidad y no considera mortalidad exógena (básicamente atribuible a la pesca). Los datos existentes agrupan este indicador en 4 categorías: alta (<1,25 años), media (1,4-4,4 años), baja (4,5-14 años) y muy baja (>14,25 años). Aunque no se obtuvieron datos completos para todas las especies, incluso algunas de tenor abundante, cabe resaltar que predominan las especies de resiliencia poblacional alta (9 especies) y media (10). Sólo dos especies se consideran de baja resiliencia (*Cordylancistrus daguae* y *Sturisoma panamense*, ambas Loricariidae, resaltadas en rojo en la tabla), muy probablemente habitantes de los raudales (tramos 1° y 2°); es posible que otras especies de esta familia, también habitantes de la zona de raudales, exhiban resiliencias bajas.

(ii) **vulnerabilidad de la especie**<sup>41</sup>, básicamente asociada a la actividad pesquera en los biotopos y hábitats de la especie (el esfuerzo pesquero puede estar dedicado a especies simpátricas, no a la especie en cuestión puesto que las artes pesqueras no son selectivas por especie) pero incluye información sobre otras causas de mortalidad, e. g.: destrucción de hábitats, contaminación... El indicador es una métrica ascendente de 0 a 100%, basada en información de la literatura especializada. Es una característica extrínseca de la especie y puede ser imprecisa al definir el status de las poblaciones de la especie en Colombia o en el sistema fluvial del Cauca, para especies endémicas. Todas las especies de la tabla 5. tienen información de vulnerabilidad; 35 de ellas presentan vulnerabilidades bajas a medias (<50%); de éstas, 21 especies poseen vulnerabilidades bajas; 4 especies presentan vulnerabilidades medias a altas, ninguna en el cuartil superior. Sorprendentemente, sólo una de las especies está en el tenor de alta biomasa, i. e., de interés pesquero: *Sorubim cuspicaudus*, cuyo status de conservación es indefinido en la tabla del EIA (Integral, 2007).

Como se dijo anteriormente, este análisis antecede la conformación de la base de datos estructurada de los registros y colecciones de casi 10 años de investigaciones ecológicas en el sistema Cauca, asocialdas al PH-Ituango, por ello no se cuenta todavía con una tabla de localidades (con características) y especies (con sus atributos) ni cualitativa ni cuantitativa para preparar una síntesis de las biocenosis del Cauca medio. La que se presenta en la tabla 7., resalta los resultados cuantitativos de los registros y colecciones de sólo 19 especies (todas incluidas también en la tabla 6.), en las estaciones de monitorización hidrobiológica (véase foto-mapa 1., p. 5).

Esta tabla, con una presentación diferente, se adaptó del informe consolidado<sup>42</sup>. Las estaciones se agrupan en tramos geográficos y se presentan totales horizontales ( $\Sigma$  por especie, ubiuidad = sitios en donde la especie se encuentra) y verticales ( $\Sigma$  por localidad, agregadas por tramo) para facilitar las comparaciones.

Las inferencias fundamentales de esta tabla están resaltadas en rojo. Tres especies, dos de ellas las más abundantes de la tabla (las tres están en el tenor de abundancia de la tabla 6.), se encuentran en todas las estaciones del Cauca, están presentes también en los afluentes pero no en todas las estaciones.<sup>43</sup> Las abundancias de todas las especies son menores en las estaciones de los tramos 1° y 2°. El tramo 3° presenta las mayores abundancias totales y por especie y las mayores riquezas de especies<sup>44</sup>. En términos generales estas características y tendencias se confirman con los resultados del rescate de peces realizado este año (véase apostilla<sup>16</sup>, p. 11) después de la desviación del río.

Una posible excepción son las especies de la familia Loricariidae, abundantes en el rescate; aunque todas las especies de Loricariidae reportadas para el Cauca medio en EIA-Ituango, (Integral, 2007), están en la tabla 6., éstas no están bien representadas en la selección de la tabla 7., estas diferencias pueden diluirse cuando la base de datos permita hacer búsquedas estructuradas<sup>45</sup>.

<sup>40</sup> Capacidad de recuperación de una población tras una perturbación catastrófica natural o inducida

<sup>41</sup> Estimativos de <http://www.fishbase.org> con base en: Cheung, W.W.L., T.J. Pitcher and D. Pauly, 2005. A fuzzy logic expert system to estimate intrinsic extinction vulnerabilities of marine fishes to fishing. Biol. Conserv. 124:97-111 y datos sobre historias y tablas vitales y estadísticas pesqueras.

<sup>42</sup> Informe Ictiofauna\_Pesca\_Cauca\_Feb\_2014.pdf. EPM, Consorcio Generación Ituango Integral - Solingral. 230 pp, sin numerar.

<sup>43</sup> Estas especies son: *Astyanax fasciatus*, *Pimelodus grosskopfii*, *Prochilodus magdalenae*, reófilas, migratorias. Aunque con bajas densidades, todas se encuentran en las partes altas del río Espíritu Santo y sólo en el sector bajo del río Ituango, en concordancia con lo afirmado sobre las limitaciones para migraciones ascendentes por esta corriente.

<sup>44</sup> Cabe anotar que los valores de la tabla son los agregados de todas las colecciones realizadas desde 2006, con diferentes artes de pesca; así que no son atribuibles a sesgos en las capturas por dificultades de muestreo.

<sup>45</sup> Se recomienda la estructuración de una *base de datos relacional* que integre dos *archivos maestros*: (i) *especies*, identificadas taxonómicamente y registradas con sus atributos biológicos, ecológicos, biogeográficos, etc.; (ii) *localidades*, identificables por sus coordenadas geográficas y topónimos, registradas con sus características físicas, limnológicas, ecológicas, culturales, etc. A estos archivos se acoplan, mediante índices, de especies o de localidades, los *archivos de datos* que registran las características variables de los individuos de los archivos maestros (las especies y los sitios). Esta estructura debe permitir búsquedas complejas, estructuradas y producir listas con condiciones, e. g., abundancias o biomasa de especies con X, Y, atributos encontradas en sitios Z, W... antes/después de una fecha dada... Una estructura como la recomendada se puede ver [aquí](#).



## V Conclusiones

Al comienzo del capítulo anterior se plantearon de manera sucinta las hipótesis fundamentales del diagrama casual, éstas son:

1. Los *eventos de sequía* en el río Cauca, aguas abajo de la presa Ituango son regulares, frecuentes, de baja intensidad, larga duración, uniformes a lo largo del tramo bajo del río.
2. Las intercambios de materia y energía entre los biotopos terrestres y los acuáticos en el río Cauca, aguas abajo de la presa Ituango, no presentan diferencias cualitativas ni cuantitativas de un tramo a otro.
3. Las comunidades de organismos acuáticos del Cauca, aguas abajo de la presa Ituango, no presentan diferencias en composición (especies y ecotipos) ni en diversidad (riqueza y abundancia) de un tramo a otro ni con los afluentes; estas comunidades no toleran los eventos de sequía y tienen una baja capacidad de recuperación.

Aunque parezca un enfoque heurístico, realmente, con base en la información recabada, no es posible concluir que las hipótesis planteadas sean válidas.

**Los eventos de sequía del Cauca medio-bajo.** En primer lugar se ha establecido que en los tres tramos del Cauca, abajo de la presa Ituango, se presentan cada año, en cualquier época, numerosos eventos de sequía de intensidad variable, predominantemente baja a media y de corta duración. La intensidad, duración y oportunidad de tales eventos son relativamente inciertas, en especial para los organismos que conforman las biocenosis de los tramos 1° y 2°. Los eventos extremos -de larga duración y alta intensidad- han ocurrido pero son raros. Las diferencias en intensidad y duración tienden a atenuarse con la distancia al sitio de presa, como consecuencia de los aportes de los tributarios, los mayores rendimientos de las cuencas aferentes inferiores y el efecto regulador de la incipiente planicie aluvial.

Se sostiene la afirmación de la baja utilidad del caudal y sus variaciones espaciales y temporales como un indicador adecuado de la heterogeneidad ecológica del sistema fluvial del Cauca medio abajo de la presa Ituango, tanto de las estructuras, como de la dinámica de los cambios recurrentes. En este contexto, la sequía inducida por el llenado<sup>46</sup> se asimila a un evento con antecedentes naturales históricos de intensidad y duración similares en el sistema fluvial del Cauca medio-bajo.

**El Cauca medio-bajo un sistema heterogéneo.** La articulación ecológica de los biotopos terrestres y acuáticos, característica del tramo 3°, no se presenta en los tramos 1° y 2°, aunque si ocurre en el sector superior del Cauca medio (las vegas y orillares relativamente largos y angostos entre La Pintada y Santafé de Antioquia); no obstante, las numerosas corrientes afluentes en estos dos tramos son cruciales en la reactivación de los igualmente numerosos raudales que alojan comunidades poco conocidas, quizás por su bajo interés económico, de peces iliófagos pertenecientes principalmente a la familia Loricariidae. Las diferencias inter-tramos pueden parecer insignificantes si se considera sólo el caudal, pero cobran relevancia si son analizadas mediante otros parámetros hidráulicos, relevantes además en un contexto ecológico, en particular la profundidad y la velocidad de la corriente.

Aunque se trate de la misma información primaria, es claro que pequeñas diferencias en caudal, en particular en el rango bajo, pueden significar grandes diferencias en lámina y radio hidráulico en los mismos sectores, tanto por la forma del lecho fluvial, como por la dinámica de los procesos de transporte y depósito de sedimentos y material de arrastre. Los avances logrados en la descripción y cuantificación de estos procesos en los tramos 1° y 2° debe continuar; éstas, al igual que su monitorización, serán de valiosa ayuda para perfilar el manejo del llenado que se recomienda más adelante.

Por otra parte, es válido afirmar que las condiciones históricas del Cauca, estimadas con base en los registros de niveles, confirman la ocurrencia de eventos extremos de sequía, más severos que aquellos predichos por los caudales; esta aparente contradicción es producto de la dinámica de agradación y degradación del lecho fluvial asociadas a los cambios hidrológicos estacionales y reafirma: (i) la noción de un ciclo, con amplia recurrencia (años a lustros), hasta ahora no descrito para este tramo del río Cauca, asociado a la frecuencia y magnitud de los derrubios, al papel crucial que su depósito y su ulterior transporte por el río desempeñan en la reactivación de los raudales y (ii) al ciclo ecológico subsecuente de colonización y desarrollo asociado a los eventos de sequías y la posterior decadencia de la biocenosis peces iliófagos/herbívoros-perifiton, asociado a las crecientes. Este conjunto de eventos sucesionales subraya la recuperabilidad de los hábitats y biotopos del Cauca medio-bajo.

**Diversidad (riqueza y abundancia de especies) y heterogeneidad espacial.** Las evidentes diferencias físicas de los tramos 1°, 2° y 3°, resaltadas anteriormente concuerdan con *bajas diferencias cualitativas* (composición de especies relativamente uniformes, riquezas relativas altas) y relativamente *altas diferencias cuantitativas* (abundancias de tales especies); aunque la evidencia se basa en sólo un 32% de las especies del Cauca medio, los datos son contundentes, en especial para las abundancias.

<sup>46</sup> Se considera aquí una sequía menor a 5 semanas, originada por un llenado sin descargas de  $Q_{\text{ambiental}}$ .

Cabe resaltar que estas diferencias se acentúan entre los dos tributarios estudiados y el Cauca medio-bajo como un todo y aún con el tramo 1° al cual confluyen; aquí incluso las riquezas de especies son extremadamente bajas. Se concluye que el sistema Cauca medio-bajo es diverso pero pobre, en concordancia con la gran dinámica ecológica identificada, mientras que los tributarios parecen ser pobres y poco diversos<sup>47</sup>.

## VI Recomendaciones

El análisis precedente justifica el conjunto de recomendaciones que se detallan a continuación, relacionadas con la propuesta de un nuevo esquema de manejo ambiental del llenado del embalse Ituango. En primer lugar se reitera la necesidad de poner en conocimiento de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales este análisis con el objetivo de motivar una revisión de las exigencias de esta entidad en relación con el manejo del llenado. A continuación las recomendaciones derivadas de este análisis.

**1. Erogación de agua río abajo durante el llenado.** Descartar la erogación de agua (caudal ambiental río abajo) durante la fase de llenado del embalse Ituango. Esta erogación no sólo es innecesaria sino contraproducente, si se considera la importancia ecológica de las sequías recurrentes en el río Cauca, en general y en particular en los tramos 1° y 2°, en donde se localizan los raudales. Se recomienda optar por una sequía corta (< 7 semanas), de intensidad media a alta (25-50% del nivel medio) en vez de una de baja intensidad pero prolongada, como la que se presentaría con un desagüe permanente de 450 m<sup>3</sup>/s durante todo el llenado.

Esta recomendación significa que *no es necesario construir una descarga de fondo ni operar las descargas intermedias del embalse Ituango para erogar agua durante la fase de llenado*. Se elude así la gran incertidumbre sobre la seguridad de las obras asociadas a las dificultades técnicas para operar las compuertas en aperturas parciales para control del caudal por las descargas intermedias y de fondo<sup>48</sup>.

Puesto que las descargas intermedias se requieren para una eventual reducción de la velocidad del llenado, por motivos relacionados con la seguridad de la presa, se recomienda que se contemple la opción de utilizarlas para erogar agua río abajo, bajo circunstancias extraordinarias, como las que podrían presentarse si durante el llenado ocurre una sequía extrema o los niveles del río en algún punto son críticamente bajos para mantener una condición deseable o un uso o aprovechamiento de recursos determinado. Estas condiciones son, en principio impredecibles, no se puede conocer a priori ni la intensidad ni la magnitud ni la duración ni la fecha en que tal situación se puede presentar; por ello, *no es conveniente establecer con antelación las reglas de decisión para la utilización de las descargas intermedias, por razones ambientales*. La definición de estas reglas debe ser el resultado de un programa de monitorización del funcionamiento, durante eventos de sequía, de los puntos críticos del río, abajo de la presa (véase recomendación 2.).

**2. Manejo adaptativo del proceso de llenado.** Adoptar un esquema de *manejo ambiental adaptativo*<sup>49</sup> para definir los detalles del manejo ambiental durante el proceso de llenado. Manejo adaptativo (MA) o manejo adaptativo de recursos (MAR), es un proceso estructurado, reiterativo, para la toma de decisiones óptimas en contextos de incertidumbre, con la meta de reducir ésta paulatinamente, mediante un sistema de monitoría<sup>50</sup>. En esta forma el proceso de toma de decisiones maximiza simultáneamente uno o más de los objetivos del manejo de recursos y, ya sea en forma pasiva o activa, acumula la información necesaria para estructurar posteriores esquemas de manejo de los recursos. MAR se caracteriza frecuentemente como la versión formal de la estrategia vernácula de aprender haciendo. MAR también se ha homologado con dos conceptos aparentemente disímiles:

<sup>47</sup> Las diferencias en riqueza entre estaciones que se reflejan en diferencias entre tramos y afluentes, no obedecen a diferencias en esfuerzos de muestreo, en todas las estaciones se alcanzó la asymptota de la curva de especies-área.

<sup>48</sup> Estas dificultades están asociadas a una cabeza hidráulica > 200 m y a las subsecuentes velocidades (> 50 m/s) y enormes presiones (4,5·10<sup>9</sup> kg/m<sup>2</sup>) ejercidas en las compuertas; para cerrarlas se requiere contrarrestar una energía potencial del mismo orden de magnitud que la capacidad instalada de la central. Un tratamiento detallado de este problema puede verse en el anexo 1.: *Consecuencias de una falla en la descarga de fondo durante el llenado del embalse*

<sup>49</sup> Holling, C. S. (editor). 1978. Adaptive environmental assessment and management. London: John Wiley & Sons. MAR se ha aplicado en numerosas ocasiones para decidir cursos de acción en problemas afines al del llenado de Ituango, v. gr. la Entidad Binacional Yacretá empleó exitosamente este esquema para manejar varios problemas ambientales de la central hidroeléctrica, en fase de operación, v. gr., sobresaturación de gases por operación del vertedero o secado recurrente del brazo Aña Cuá del río Paraná; véase: J. D. Quintero, E. Sánchez-Triana, L. C. García Lozano, & C. E. Ménem. 1997. Environmental Impact Assessment. A Plea for an Adaptive Tool for Environmental Assessment Management: the Case of the Yacretá Binational Project. IAIA.

<sup>50</sup> La palabra *monitoría*, de origen latino, no está aceptada en el idioma castellano, pero su uso se ha hecho común. En inglés, de donde la hemos prestado, significa la *actividad de observar, medir o vigilar un fenómeno o proceso, con el objeto de detectar cambios y producir señales de prevención o alarma*. El término, en un contexto ambiental, se ha asimilado a la confrontación de un pronóstico del comportamiento de un proceso dado con el diagnóstico de cómo en la realidad ocurre dicho proceso, que incluye la no ocurrencia del fenómeno y la ocurrencia de situaciones no pronosticadas. Recientemente (2015) la RAE ha adoptado en castellano la palabra *monitorización* y es la usada en este documento.

(i) el proceso dialéctico de planificación → ejecución → evaluación → revisión → planificación, implementado rutinariamente por las agencias gubernamentales de muchos países, tanto de economías capitalistas como de economías de comando y por organizaciones privadas, supeditadas a las fluctuaciones de los mercados de sus insumos y productos y a la competencia

(ii) el proceso evolutivo orgánico, también de naturaleza dialéctica, explicado por la concurrencia de la genética mendeliana como freno (conserva estructura genética) y de la selección natural darwiniana como acicate (diversifica): replicación genética ← mutaciones y cambios externos → selección natural → evolución y adaptación → replicación genética

En los dos casos los resultados de un proceso previo son re-incorporados al proceso para aumentar el conocimiento y redireccionar los resultados posteriores. En este caso de PH-Ituango, el evento incierto, objeto de *manejo adaptativo*, es el llenado del embalse; pero la monitorización no es únicamente de este proceso per se que es singular, único e irrepetible, sino también de las sequías naturales recurrentes del río, cuyas consecuencias, como se ha subrayado reiteradamente a lo largo de este análisis, son semejantes.

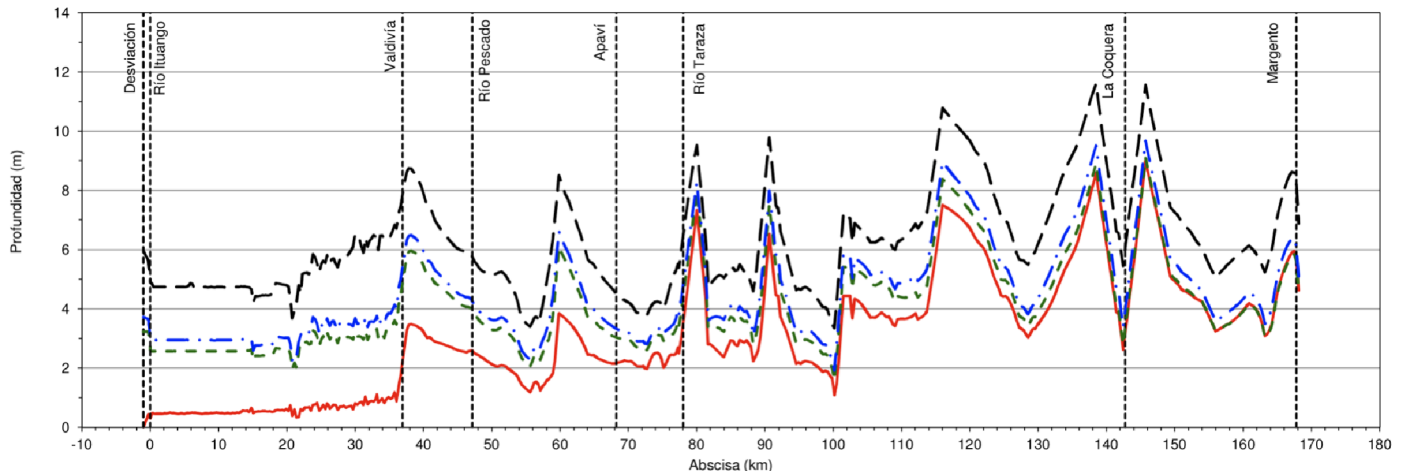


Fig. 7a. Variación de la profundidad a lo largo del río Cauca, aguas abajo de presa Ituango durante el llenado con diversos caudales. En condiciones naturales, para un caudal determinado, en este caso el caudal medio ( $Q_{medio}$ ) con  $pr$  0,43%, la profundidad varía ampliamente dentro de un mismo tramo, situación replicada por otros caudales de llenado. Nótese que las diferencias entre niveles generados por distintos caudales son pequeñas a partir de Puerto Valdivia, en especial abajo del río Tarazá.

caudal medio del río ———  
 sequía extrema  $I_{recurrencia}$  0,5% ———  
 descarga de fondo  $Q_{ecológico}$  450 m<sup>3</sup>/s - - -  
 sin descarga de fondo ———

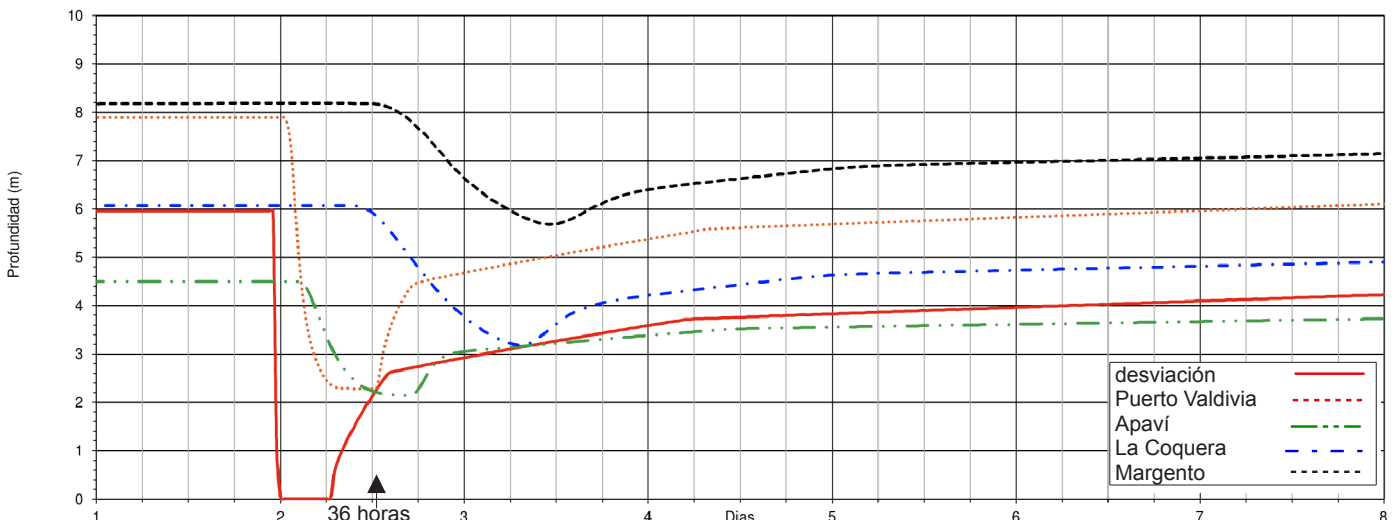


Fig. 7b. Cambios temporales de la profundidad en varios puntos del río Cauca aguas abajo de presa Ituango; llenado con caudal medio ( $Q_{in} = 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ). En todas las estaciones la lámina supera el 50% de la original (sin llenado) ca. 36 horas después de iniciado el descenso causado por el llenado que puede retardarse desde ca. 6 horas en Pto.Valdivia hasta ca. 24 horas en Margento. Aunque ninguna estación alcanza la profundidad normal para el caudal dado después de 8 días de llenado, la diferencia relativa disminuye con la distancia a la presa Ituango: 28% en la desviación, hasta ca. 12% en Margento.

Se ha establecido que eventos de sequía semejantes en intensidad y duración a la esperada durante el llenado de Ituango se han presentado en la breve historia del río Cauca que cuenta con registros hidrométricos; véase fig. 7. También se ha establecido que la oportunidad (época del año hidrológico cuándo el evento ocurre) no es relevante, dada la alta irregularidad de las sequías en el Cauca y la imposibilidad de modificar los programas de obra del proyecto por razones técnicas y económicas. Es decir, se escoge, por razones técnicas, una fecha de cierre de la desviación del río Cauca para iniciar el llenado; a esa fecha se asocia una probabilidad de caudales (y niveles)... pero es evidente que esa predicción puede errar por exceso o defecto.

Este conflicto se soluciona mediante el *manejo adaptativo* consistente en: (i) *monitorización previa* del sistema fluvial Cauca para precisar las consecuencias de la sequía inducida y sus variaciones con diferentes intensidades y duraciones y (ii) *monitorización durante el llenado* mismo para decidir acerca de la operación de las descargas intermedias para paliar eventuales consecuencias.

**3. Manejo adaptativo para precisar llenado: monitorización y estudios complementarios.** *Qué* monitorizar, *cómo* llevarlo a cabo, *en dónde*, *con qué intensidad* y *frecuencia*, durante *cuánto tiempo* y *cómo utilizar los resultados* para disminuir la incertidumbre del evento incierto, objeto del manejo adaptativo: el manejo ambiental del proceso de llenado (MAL), son preguntas fundamentales. El desarrollo del ciclo de programas de monitorización recomendados, véase fig 8., en esencia constituye el *manejo adaptativo del llenado de Ituango*.

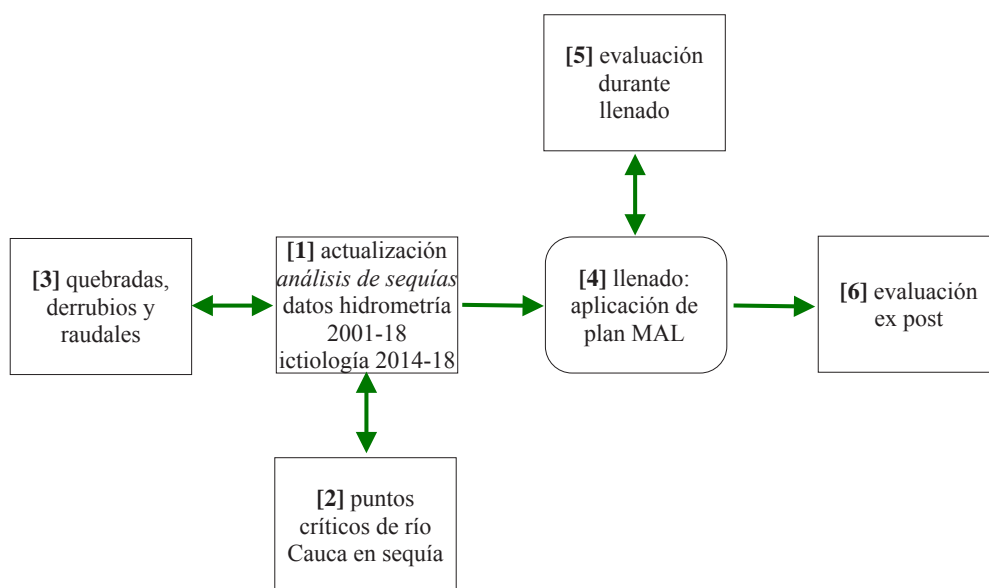


Fig. 8. Manejo adaptativo de Ituango: esquema simplificado de monitorización para formulación y ejecución del *plan de manejo ambiental del llenado* (MAL). Con base en [1], la actualización del *análisis y seguimiento de sequías* (ASS), se definen [2] y [3], las dos *monitorizaciones previas al llenado*; este es un proceso reiterativo y circular, i. e., los resultados de las monitorizaciones deben realimentar el ASS hasta la sequía inmediatamente anterior al inicio del llenado. Con base en esta última iteración se formula el plan MAL definitivo y se implementa, [4]. El plan MAL es objeto de *seguimiento durante su implementación* [5] y puede derivar en ajustes o modificaciones del plan mismo, e. g. definir la necesidad de erogar agua por las descargas intermedias o aumentar o disminuir esta cantidad si MAL así lo exigió. Una vez terminado el llenado y el río Cauca reciba descargas normales vía vertedero o turbinas, se inicia [6] la última monitorización para la *evaluación ex post*. De ésta última se pueden derivar lecciones importantes para el manejo de *eventuales sequías inducidas por la operación de la CH-Ituango*, e. g.: mantenimiento durante períodos de bajos caudales y bajos niveles en el embalse o durante el llenado de Cañafisto, embalse hidroeléctrico en fase de diseño aguas arriba de PH-Ituango...

(i) *revisión de análisis y seguimiento de sequías* (ASS), es en cierto modo la actualización permanente de este informe, en primer lugar con los datos hidrométricos de las estaciones H1 a H6 registrados desde 2001 y segundo, con los resultados de estudios limnológicos e ictiológicos concurrentes con este análisis y que por tanto no fueron consultados para este informe y en segundo lugar, como se indica en la figura 8., periódicamente con los futuros resultados de estas monitorizaciones. El objetivo terminal de este análisis es la definición detallada del plan de manejo ambiental del llenado (MAL).

(ii) *monitorización de puntos críticos del río en sequía*, i. e., aquellos que pueden sufrir cambios severos o indeseables durante el llenado. La monitorización debe comenzar con la identificación de dichos puntos, definir rutas y tiempos de acceso y establecer un sistema de comunicación de alarmas tal que el programa de mediciones u observaciones pueda reactivarse a corto plazo. Esta monitorización se ejecuta en tres oportunidades: previa al llenado, [3] en la figura 8., durante el llenado, [5] y con posterioridad a este, [6].

(iii) **monitorización de quebradas, derrubios y raudales**, tal como ha sido subrayado en el capítulo IV, los raudales son elemento natural de amortiguación de las sequías, no en el sentido de que almacenen agua, sino en el de constituir sitios de concentración natural de organismos que pueden sufrir cambios drásticos durante las crecientes. Aunque esta afirmación se sustenta con abundante información generada por EPM y sus contratistas, es conveniente mejorarla y aumentarla. Al igual que en la anterior, esta monitorización se ejecuta en tres oportunidades: previa al llenado, [3] en la figura 8., durante el llenado, [5] y con posterioridad a éste, [6]. Una síntesis de los puntos básicos de estas monitorizaciones, se presentan en la tabla 7.

Tabla 8. Características de las monitorizaciones requeridas para el manejo adaptativo del llenado

programa	etapa	frecuencia	duración (meses)	comentarios/observaciones
puntos críticos del río en sequía	selección de puntos críticos		1	típicos puntos críticos incluyen: tramos llanos, bocas de caños de ciénagas, bocatomas de acueductos, descargas de aguas negras en sectores susceptibles de aislarse durante sequías extremas, brazos para navegación menor en tramos furcados...
	diseño		3	parámetros a evaluar, frecuencias, metodos de medición y de procesamiento de información, utilización de resultados en contexto de objetivos de programa. Frecuencia no puede ser por calendario, justamente porque evento es irregular; requiere reactivación en caso de sequía, mediante comunicación oportuna de señal de alarma
	programación		1	incluye tiempos, precedencias, personal, logística, presupuesto
	desarrollo de programa		48	puede ajustarse según resultados
	evaluaciones previas (informe)	anual	1	puede ajustarse según resultados
	ajuste/rediseño de programa	anual	1	puede ajustarse según resultados
	informes finales	sequía anterior a llenado		2
	al finalizar llenado		1	
	ex post		2	
quebradas, derrubios y raudales	selección quebradas y raudales piloto		2	criterios de selección: representatividad, acceso, estado de conservación. Programa incluye: (i) cartografía de biotopos terrestres y acuáticos, diacrónica si es posible con aerofotos e imágenes satelitales; (ii) definición de "tabla vital" de derrubios* para predecir reactivación de raudales y vaticinar dinámica de recursos asociados a raudal; (iii) caracterización de biocenosis peces-perifiton+bacterias en raudales, ciclo intranual asociado a sequía-creciente y ciclos plurianuales asociados a "renovación" de derrubios y depósitos.
	diseño		2	incluye tiempos, precedencias, personal, logística, presupuesto
	programación		0,5	
	desarrollo de programa	trimestral/semestral	48	observaciones trimestral o semestrales + visitas de verificación cuando efectivamente ocurran derrubios
	evaluaciones previas (informe)		6	puede ajustarse según resultados
	ajuste/rediseño de programa	anual	1	puede ajustarse según resultados
	informes finales	sequía anterior a llenado		2
	al finalizar llenado		1	
	ex post		2	

Tabla continúa en página siguiente

Tabla viene de página anterior

Tabla 8. Características de las monitorizaciones requeridas para el manejo adaptativo del llenado

programa	etapa	frecuencia	duración (meses)	comentarios/observaciones
ASS: revisión de análisis de sequías con base en hidrometría 2000-2018, ictiología 2014-2018	trabajo en esencia similar a este		3	revisión debe incorporar además: - resultados preliminares y finales de monitorizaciones previas - nuevas proyecciones de caudales, niveles, secciones transversales, radios hidráulicos... del río entre presa Ituango y Las Flores - resultados de monitorizaciones concurrentes - revisión debe generar ajustes a monitorizaciones concurrentes
	informe final	sequía anterior a llenado	2	

\* Tabla *vital* de un derrubio, por analogía con las clases de edades o con los estadios de los ciclos vitales en las matrices de Leslie - Leftkovich, cada fecundidad y probabilidad específicas -a la clase o estadio- de generar progenie y de morir o pasar al estadio siguiente, en los modelos de crecimiento de poblaciones: *formación de derrubio en la quebrada* (nacimiento) - *acumulación de material* (crecimiento) - *deslizamiento y depósito en la orilla del río Cauca* (madurez) - *arrastre por creciente* (muerte); véanse, e. g.:

R. Bravo de la Parra, E. Sánchez. 1998. Aggregation methods in population dynamics discrete models. *Mathl. Comput. Modelling* 27(4):23-39.

L.P. Leftkovich. 1965. The study of population growth in organisms grouped by stages, *Biometrics* 21, 1-18

P.H. Leslie. 1945. On the use of matrices in certain population mathematics, *Biometrika* 33, 183-212.

El Pr. Dr. Ernst Schrimpf/[Technische Hochschule Weihenstephan](#), desarrolló en los años  $\approx$  1970 una metodología basada en ACP para predecir derrumbes, con base en características geotécnicas del material susceptible de derrumbe y del talud en donde éste yace; ésta la aplicó con éxito en carreteras de CVC, Valle del Cauca y Cauca y podría ser útil en la definición de las probabilidades de formación (nacimiento) y persistencia de derrubios en sitios del raudales.

# Proyecto hidroeléctrico Ituango: manejo ambiental adaptativo de la fase de llenado

## Anexo 1: riesgos de operación de una descarga de fondo

Medellín, 1.6.14

La licencia ambiental para las obras y operación de las instalaciones del proyecto hidroeléctrico Ituango (PH-Ituango) fue otorgada por la autoridad ambiental competente<sup>1</sup> en 2009; el manejo exigido por la licencia ambiental<sup>2</sup> implica la descarga de un caudal constante de  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ , a partir del momento de cierre de la desviación, es el denominado *caudal ambiental* ( $Q_A$ ); éste debe desaguar a través de una estructura de control ubicada en el lecho del río (cota 210 m), es la denominada *descarga de fondo*, conformada por dos compuertas planas de 3,30 m de anchura por 4,12 m de altura. El tiempo de llenado del embalse es función del caudal de entrada ( $Q_{in}$ ); la figura 1A. muestra el rango para caudales de entrada entre 500 y  $1.250 \text{ m}^3/\text{s}$ , sin descarga de caudal ambiental. Si opera una descarga de fondo con capacidad para desaguar el  $Q_A$ , los tiempos de llenado se extienden considerablemente, desde 45,3 hasta 635 días para un caudales de entrada de 1250 y  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente.

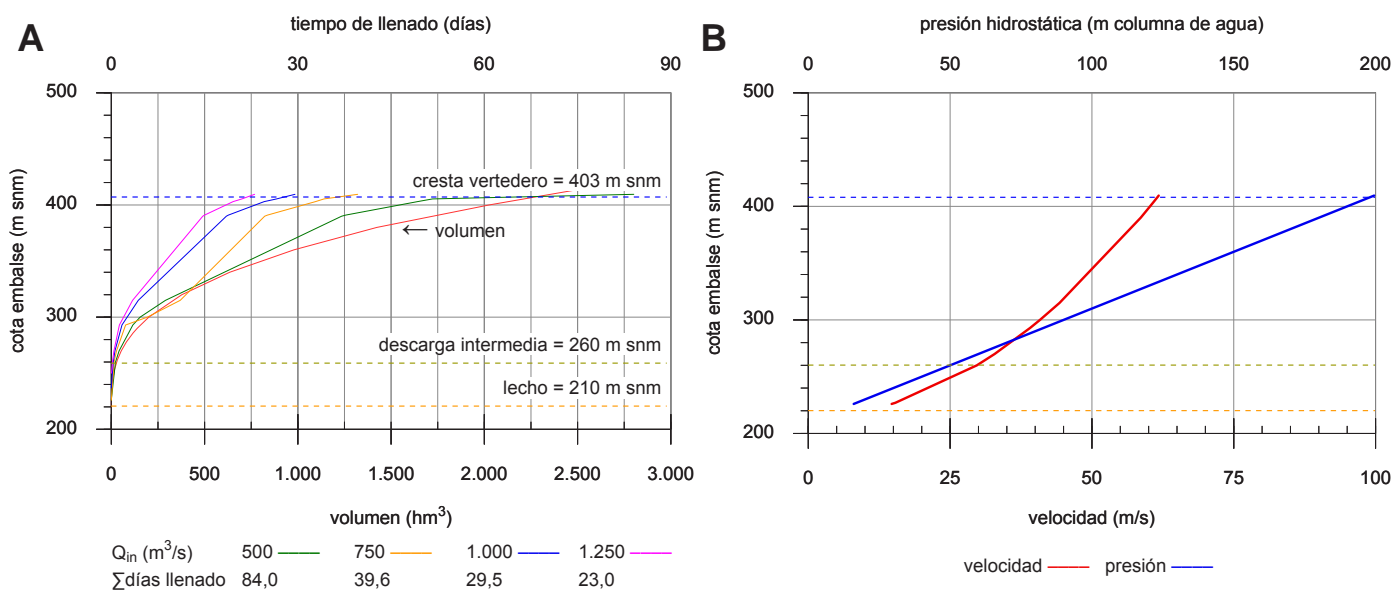


Figura 1A. Tiempos de llenado del embalse para diferentes caudales de entrada ( $Q_{in}$ ), sin paso de caudal ambiental. B. Aumento de presión hidrostática a la entrada de la descarga de fondo y de la velocidad de la descarga en función de la profundidad del embalse.

La velocidad de ascenso de nivel en el embalse aumenta con el caudal del río Cauca y disminuye con la profundidad alcanzada, como consecuencia de la ampliación altitudinal del valle fluvial.

La magnitud de la cabeza hidrostática aumenta con la profundidad del embalse (véase figura 1B.) y se traduce en una mayor velocidad de salida del agua de la descarga de fondo; ésta podría alcanzar  $30 \text{ m/s}$  ( $108 \text{ km/h}$ ) cuando el nivel llegue a la altura de la descarga intermedia (cota 260), véase tabla 1.

Dado que el área de la sección de la descarga es fija ( $27,2 \text{ m}^2$ ), el caudal desaguado aumenta vertiginosamente, desde los  $450 \text{ m}^3/\text{s}$  iniciales, cuando empiece el llenado, alcanza  $808 \text{ m}^3/\text{s}$  cuando el nivel está apenas en la cota 260, es decir en la descarga intermedia. Esto significa que el embalse no se llenaría más arriba de la descarga intermedia si los caudales de entrada ( $Q_{in}$ ) son menores

<sup>1</sup> Resolución N° 0155 del 30 de enero de 2009, otorgada por la entonces Dirección de Licencias, Permisos y Trámites Ambientales del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, hoy Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA).

<sup>2</sup> Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución n° 0155, 30 de enero de 2009. §9°, numeral 1.1.1. "Etapa de llenado: El caudal que se debe garantizar desde la estructura de la presa sin operar la casa de máquinas deberá ser de  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ ."

Tabla 1. Caudal de la descarga de fondo; compuertas sin control de cierres parciales

cota (m snm)	Q <sub>salida</sub> (m <sup>3</sup> /s)
226	399,5
227	417,2
260	808,0
270	893,2
293	1.063,7
300	1.110,5
315	1.204,5
390	1.593,3
391	1.597,9
403	1.651,5
405,4	1.662,0
406	1.664,6
409,5	1.679,8

de 800 m<sup>3</sup>/s y por tanto la central no podría empezar a generar energía, como quiera que la plazoleta de captación (altura mínima), está localizada en la cota 350.

Esta compleja situación exige que las compuertas de la descarga de fondo puedan funcionar con cierres parciales, de tal manera que el área disminuya a medida que la presión hidrostática (la profundidad del embalse) aumente y el caudal de salida se mantenga alrededor de los 450 m<sup>3</sup>/s requeridos por la autoridad ambiental. Esta condición deseable no puede lograrse con compuertas planas deslizantes como las de la descarga de PH-Ituango.

Dos factores juegan un papel importante en esta limitante y son los que justamente hacen de PH-Ituango un proyecto sui generis: la magnitud de la cabeza hidráulica y el caudal manejado<sup>3</sup>. A esto se auna el hecho de que el Cauca, en el tramo medio donde el proyecto se localiza, transporta una altísima carga de sólidos en suspensión (más alta que la de otros grandes ríos en Colombia (0,89 g/L) que otorga un altísimo poder abrasivo al agua, capaz de erodar la estructuras de las compuertas.

Desde comienzos de 2012 la Junta de Asesores del Proyecto Hidroeléctrico Ituango (JAPHI) identificó<sup>4</sup> complejidades técnicas singulares asociadas al tamaño y profundidad de las compuertas en la descarga de fondo y a su operación con cierres parciales, requeridos para mantener un flujo constante de 450 m<sup>3</sup>/s como caudal de reposición durante las primeras horas del llenado del embalse. En informes posteriores<sup>5</sup>, la JAPHI ratificó estos análisis y recomendó:

- (i) eliminar la descarga de fondo,
  - (ii) construir la descarga intermedia a una profundidad mayor que la estaba prevista en ese entonces (cota 260) y
  - (iii) re-analizar el manejo ambiental del llenado del embalse Ituango con las consideraciones derivadas de los puntos anteriores y tomando en consideración modificaciones del plan de manejo del llenado que reduzcan la magnitud de Q<sub>A</sub>:
    - posibilidad de reducir el caudal ambiental a 250-300 m<sup>3</sup>/s en atención al carácter singular y de corta duración del llenado;
    - establecer los requerimientos de caudal y caracterizar el (los) punto(s) crítico(s) más cercano(s) a la presa en donde puedan ocurrir interferencias con el aprovechamiento de recursos;
    - reemplazar el concepto de un *flujo constante* de 450 m<sup>3</sup>/s por uno de *flujo promedio* mediante la construcción de dos o tres compuertas en paralelo, en la descarga intermedia, eliminando así la necesidad de cierres parciales de dicha descarga que es la síntesis de la problemática.
- "(...) [JAPHI considera que] *los riesgos que implica la descarga de fondo para cumplir las exigencias de un caudal mínimo de 450 m<sup>3</sup>/s durante el llenado del embalse no compensan los beneficios ambientales que se obtendrían. (...) Recomienda que se prepare un informe sobre este aspecto y se insista ante la ANLA en la modificación de los requerimientos de caudal ecológico basado en aspectos técnicos del alto riesgo para el proyecto y los impactos ambientales mínimos que se tendría bajo el esquema propuesto* [por JAPHI]. (...)"

En concepto de los expertos consultados por EPM, la construcción de una descarga de fondo en PH-Ituango forzaría a incurrir en riesgos considerables de: (i) retrasos inevitables en la terminación de las obras, (ii) causar daños irreparables en la infraestructura; (iii) perder buena parte de las inversiones del proyecto (iv) causar daños ambientales incommensurables aguas abajo de la presa en las vertientes empinadas del río Cauca. Estas consideraciones motivaron la revisión del plan de manejo del llenado que se detalla en el documento principal.

<sup>3</sup> Estas condiciones han dificultado la confección de una lista de proveedores idóneos para la fabricación de las compuertas deslizantes de PH-Ituango. En un estudio de mercado realizado por EPM para licitar la fabricación de las compuertas que cumplieran con las especificaciones de diseño: presión = 206,68 mca; área = 13,6 m<sup>2</sup>, fue necesario reducir las especificaciones al 60% (presión = 124 mca; área = 8,16 m<sup>2</sup>) a fin de incluir un número mínimo de proponentes. Sólo se obtuvieron 6 fabricantes con un total de 10 instalaciones en operación.

<sup>4</sup> EPM Ituango. 2012. Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Construcción del proyecto. Informe n° 1 Junta de Asesores. Medellín, febrero 2012. 51 pp.

<sup>5</sup> EPM Ituango. 2013. Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Construcción del proyecto. Informe n° 2 Junta de Asesores. Medellín, agosto 2013. 36 pp.

EPM Ituango. 2013. Proyecto Hidroeléctrico Ituango. Construcción del proyecto. Informe n° 3 Junta de Asesores. Medellín, noviembre 2013. 39 pp.