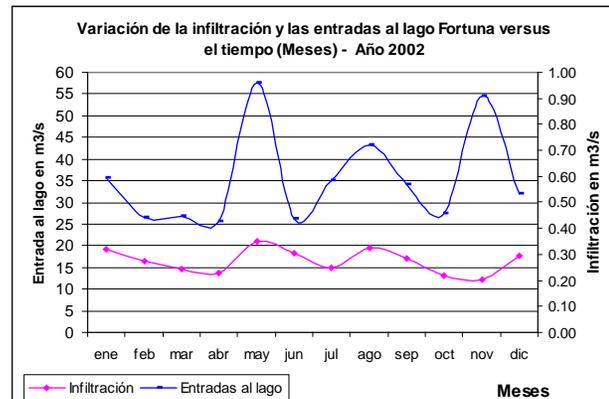
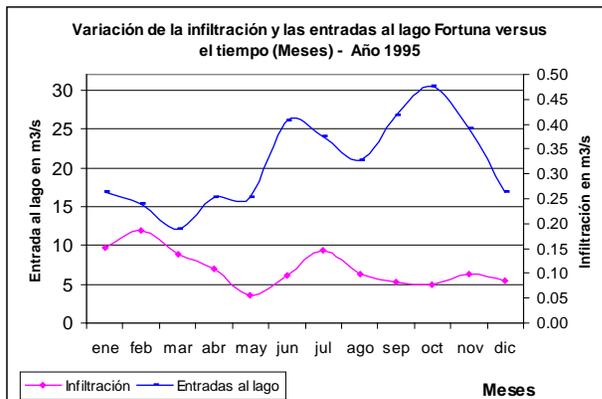


Q-ESA: UN MODELO PARA EL CAUDAL AMBIENTAL

ANTECEDENTES DEL MODELO.

A mediados del año 2002 se pidió una evaluación del impacto ambiental (EsIA), del trasvase hacia el embalse de la Hidroeléctrica Fortuna, provincia de Chiriquí, de las aguas naturales de cinco quebradas pequeñas tributarias del segmento del caudal residual del río Chiriquí, con la finalidad de mejorar el rendimiento energético del complejo en un 4%. Las condiciones del proyecto, al situarse dentro de un bosque protegido exigían un cálculo milimétrico del caudal de uso, que cumpliera con el volumen adecuado al ecosistema, pero también con el rendimiento óptimo exigido por la obra.

Una evaluación del sistema ambiental fluvial, realizado por un equipo interdisciplinario de especialistas, encontró que el caudal residual de la Hidroeléctrica Fortuna había provocado algunas variaciones en el sistema ecológico ribereño, pero también, que se había restablecido su equilibrio dinámico en el tiempo y en lo esencial mantenía su integridad sistémica original. La filtración de la presa de enrocado, en la serie de los diez últimos años había sido de 0,198 m³/s en promedio anual, cuando el caudal del río Chiriquí en el sitio era de 27,7 m³/s, o sea que apenas representaba el 0,7% del caudal promedio anual del río, cifra muy lejos de lo que normalmente se estimaba para un caudal ambiental; algo parecido a lo que también sucede con el caudal residual del río Chagres en la parte atlántica del Canal de Panamá.



El análisis realizado sobre los caudales, concluyó que habían varios aspectos importantes combinados para garantizar este resultado: factores climáticos, morfología del cauce, secciones de abrevaderos con agua suficiente para la fauna terrestre, casi ningún uso consuntivo en la sección más afectada, existencia de varios afluentes tributarios del segmento desecado, especialmente en las secciones de mayor uso hídrico; pero sobre todo, que a lo largo de los años no había fluido un caudal constante, sino un régimen de caudales con una significativa variabilidad estacional e hiperanual bajo los patrones del régimen natural del río.

Del fenómeno observado se sacaron dos criterios básicos para el cálculo del caudal ambiental:

- Diseñar no un caudal ambiental constante, sino un régimen de caudal mínimo para la sostenibilidad, que debe tener sus mínimos y máximos y garantice una variabilidad estacional e hiperanual según años de climas extremos y regulares.
- No corresponder con este caudal únicamente a la sostenibilidad del ecosistema natural, sino más bien a la del sistema ambiental fluvial y ribereño en el que está presente la naturaleza y la sociedad, con todos sus atributos de vida.

FUNDAMENTO GNOSOLÓGICO DEL MODELO.

Al relacionar el recurso fluvial con su entorno inmediato, el fundamento conceptual del modelo considera al conjunto como un todo sistémico, formado no solamente del componente natural, sino también cultural, socioeconómico y humano. Desde el punto de vista cibernético, la dimensión epistémica está asociada entonces a lo que se llama “*sistema complejo disipativo*” (*SCD*), el cual articula elementos, órganos, fenómenos y procesos cuya conexión constituye precisamente el todo, junto a funciones de coordinación y escalas de subordinación a lo interno, y un carácter específico de interacción con el entorno externo. Sus características esenciales son sus cualidades estructurales-funcionales, su composición, los procesos dinámicos y el carácter de su interacción con las condiciones externas.

Con este marco de por medio se revisaron las metodologías existentes para la elaboración del modelo, buscando siempre ubicar la que resolviera estos principios básicos. Sin embargo se encontró que si bien todas tienen una buena base racional para el estricto dominio que investigan, no resolvían la necesidad de definir el caudal ambiental a la luz de la totalidad del sistema ambiental y no sólo de un fragmento de éste. Tal es el argumento que llevó a crear el Modelo “*Caudal Ecológico para el Sistema Ambiental*” (Q-ESA).

DEFINICIONES PARA EL MODELO.

Caudal Ambiental:

Se entiende por Caudal Ambiental el caudal circulante mínimo de un cauce capaz de sostener la composición, funcionamiento y estructura fundamental del sistema ambiental fluvial, que existiría en las condiciones naturales de caudal.

El modelo consiste en encontrar mediante un “**Índice de Afectación** (ϕ_A)” del sistema ambiental, función del caudal (Q), los valores medulares siguientes: caudal promedio anual correspondiente al “**Límite Permissible de Afectación**” o L_P del sistema, llamado “**Caudal Ecosistémico Permissible** (Q_{EP})”; “**Caudal Ecosistémico Máximo** (Q_{EM})”, caudal que corresponde a la regularidad de un año climático extremo húmedo; “**Caudal Ecosistémico Base** (Q_{EB})”, caudal ecosistémico que corresponde a la regularidad de un año climático normal; “**Caudal Mínimo Absoluto** (Q_{ma})”, caudal correspondiente al régimen ecosistémico de aguas circulantes equivalentes a un “*mínimum minimorum mes*” en el régimen normal de caudales, y el “**Caudal Ambiental** (Q_{AM})”, que desde el punto de vista del rendimiento ecológico del río es el valor más importantes a determinar y se hace a la luz de diversos análisis programados durante diez años, en un rango de variaciones que se sitúan entre Q_{EP} y Q_{EM} hasta concluir en su valor adecuado. Salvo el Q_{ma} , todos son promedios anuales, alrededor de los cuales se construye tanto para años húmedos como años secos y normales un “**Régimen de Caudal Ambiental**”. Este “Índice de Afectación” registra en esencia, el estado de alteración del sistema debido a su grado de perturbación por la acción de reducción del caudal.

Otras definiciones:

- **Variables:** Elementos dinámicos representativos de atributos fuertes y pertinentes del sistema ambiental, cuya alteración en función de caudales es medible.
- **Ponderación de la variable:** Factor numérico multiplicativo que expresa el peso del atributo al que representa, en el marco del proceso de alteración del sistema.
- **Caudales-tipo:** Son los valores Q utilizados para establecer los valores discretos de la función del “Índice de Afectación” del sistema. Para ello se trabaja con los siguientes caudales: Caudal promedio anual (Q_A); Caudal mínimo mes (Q_M); Caudal mínimo 7 días (Q_5); Caudal mínimo *minimorum* (Q_{mm}); Caudal 10% del caudal promedio anual (Q_{10}); Caudal 5% del caudal promedio anual (Q_5); Caudal 0% (Q_0).

OPERACIÓN DEL MODELO.

El modelo trabaja con 12 variables a saber:

- **Medio Físico:** Capacidad de dilución de contaminantes, Transporte de sedimentos y nutrientes, Morfología del cauce, Calidad paisajística.
- **Medio Biótico:** Fauna acuática de importancia ecológica y/o económica, Vegetación de galería, Ecotonos ribereños, Usos por la fauna terrestre.
- **Medio Socioeconómico y cultural:** Uso consuntivo del agua, Uso para transporte acuático, Uso recreativo del agua, Factores míticos e históricos.

El “Índice de Afectación” ϕ_A está definido por un “Valor de Alteración” (V_{Aii}) de cada variable, como efecto directo de la variación de los caudales Q_j . Utilizando una matriz multicriterio, que integra los valores de alteración en un valor único, se logra entonces el índice por la fórmula siguiente:

$$\phi_A = \frac{\sum_{i=1}^{12} \rho_i V_{Aji}}{\sum_{i=1}^{12} \rho_i}$$

Donde ρ_i es el valor de ponderación de las variables.

Dado que V_{Aji} es una función determinada por Q_j y ϕ_A una función creciente, dependiente unívocamente de V_A , tendremos $\phi_A = f(Q)$, siendo f una función de crecimiento finito en el segmento seleccionado de Q y continua, de tal manera que cuando el caudal corresponde al promedio anual normal (Q_A), entonces $\phi_A = 0$, y cuando el caudal se reduce a cero (Q_0) el índice es $\phi_A = 5$. Se tendrá así que el Índice de Afectación está comprendido entre 0 y 5, es decir $0 \leq \phi_A \leq 5$.

Para determinar el Caudal Ecológico Permissible, a los valores discretos de la función f se le aplica un ajuste de curva por regresión no lineal, con una función exponencial decreciente. La función encontrada viene dada por la relación:

$$\phi_A = 5 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{Q_{LE}}\right)$$

Q_{LE} es una constante llamada “Caudal del Límite Elástico”. Si existiera una elasticidad del medio tal que resistiera un caudal promedio anual 0, la constante sería nula; en tanto que si fuera tal que sólo resistiera caudales cada vez más cercanos a Q_A , Q_{LE} tendería al infinito. Esta función logra una exactitud del orden de $\text{Chi}^2 = 0,04 (\pm 0,03)$.

Si se toma en cuenta que por definición, el Límite Permisible de Afectación L_P pertenece al conjunto $\{ \phi_A \}$, los valores correspondientes al Límite Permisible de Afectación –y que definen el Caudal Ecosistémico Permisible– van a depender del umbral de la resiliencia del sistema ambiental, cuantificado en la escala de 0 a 5 del Índice de Afectación. Los valores establecidos son los siguientes¹:

- | | |
|--|--------------------------|
| ▪ Alta biodiversidad y baja vulnerabilidad social en estiaje | Límite permisible = 1,90 |
| ▪ Alta biodiversidad y media vulnerabilidad social en estiaje | Límite permisible = 1,85 |
| ▪ Alta biodiversidad y alta vulnerabilidad social en estiaje | Límite permisible = 1,75 |
| ▪ Media biodiversidad y baja vulnerabilidad social en estiaje | Límite permisible = 1,65 |
| ▪ Media biodiversidad y media vulnerabilidad social en estiaje | Límite permisible = 1,55 |
| ▪ Media biodiversidad y alta vulnerabilidad social en estiaje | Límite permisible = 1,45 |
| ▪ Baja biodiversidad y baja vulnerabilidad social en estiaje | Límite permisible = 1,35 |
| ▪ Baja biodiversidad y media vulnerabilidad social en estiaje | Límite permisible = 1,25 |
| ▪ Baja biodiversidad y alta vulnerabilidad social en estiaje. | Límite permisible = 1,00 |

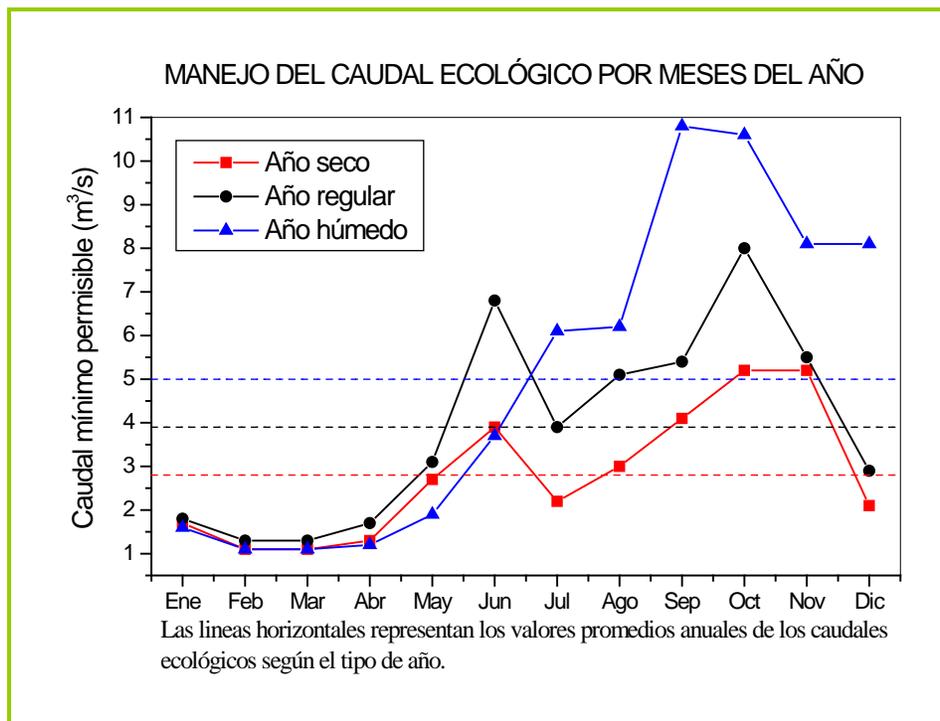
De la curva de ajuste sale así el Caudal Ecosistémico Permisible (Q_{EP}), como el valor de caudal correspondiente al Índice de Afectación Permisible, definido en la ocasión no por Q sino por una constante determinada por la resiliencia del sistema: el límite de la capacidad de resistencia del medio ambiental a la entropía. Con este valor encontrado se construye toda la pirámide del régimen, comenzando por lo que se ha llamado el Caudal Ecosistémico Base (Q_{EB}).

El Caudal Ecosistémico Base está dado por la fórmula: $Q_{EB} = \lambda \cdot Q_{EP}$ donde λ es igual a la proporción que existe entre el caudal promedio anual de las aguas circulantes, en una serie de 20 años o más, y el caudal promedio anual del año más seco.

El Caudal Ecosistémico Máximo a su vez está dado por: $Q_{EM} = 2\lambda \cdot Q_{EP} - Q_{EP} = Q_{EP}(2\lambda - 1)$

¹ Esta escala puede variar de acuerdo a rasgos singulares de las bioregiones continentales, y se establece por el método Delphi.

Finalmente el Régimen de Caudal Ambiental se construirá considerando los años húmedos, normales y secos, y transfiriendo a los caudales ecológicos promedios respectivos (Q_{EM} , Q_{EB} , Q_{EP}) la misma proporcionalidad existente entre el promedio anual del caudal natural original más representativo de la condición climática estudiada (caudal del año con precipitación más cercana al promedio del conjunto de años húmedos, normales o secos) y las variaciones de caudales mensuales del río de ese año. Se sacará entonces una proporcionalidad para cada situación climática de años extremos y normales. El Modelo Q-ESA establece en esencia, unos rangos en los que los caudales ambientales deben moverse para garantizar la variabilidad estacional e hiperanual que permita la sostenibilidad de la vida acuática.



Resultados del cálculo del régimen de caudal ecológico, aplicable al Proyecto Hidroeléctrico El Alto situado en la provincia de Chiriquí. En este proyecto, el área presentando la característica de una media biodiversidad y baja vulnerabilidad social bajo condiciones de sequía, el valor del Límite Permisible de Afectación fue de **1,65** y el **Caudal Ecosistémico Permisible** fue entonces de **$Q_{EP} = 2,795 \text{ m}^3/\text{s}$** .

El modelo opera durante su aplicación con un programa de monitoreo, destinado a evaluar resultados y establecer el “*Caudal Ambiental*”. Este programa toca 12 ítems que recorren el medio físico, biológico y socioeconómico, y se prolonga durante los 10 primeros años de la operación del proyecto. Estos son:

Medio Físico:

- Caudal residual en el origen del segmento desecado (este registro debe ser mínimo semanal).
- Geomorfología del cauce y borde (nuevos modelados, erosión y deslizamientos del borde)
- Calidad de aguas (con énfasis en el oxígeno disuelto, DBO₅, DQO, temperatura, sólidos suspendidos y disueltos, pH y todo parámetro contaminante que haya sido encontrado no conforme en la línea base ambiental con el agua natural). Este monitoreo debe hacerse tanto en período lluvioso (dos veces) como seco de cada año.

Medio Biótico:

- Fitoplancton, zooplancton y especies acuáticas de importancia ecológica.
- Vegetación acuática emergente y sumergida.
- Evolución del bosque de galería (crecimiento de árboles, pérdida de especies, estado del sotobosque).
- Emigración de especies de la fauna terrestre.
- Evolución de ecotonos (pérdidas de los existentes y registro de nuevos que se desarrollen).

Medio Socioeconómico:

- Cambios en las prácticas productivas y uso del suelo.
- Consumo del agua.
- Cambios en las prácticas del uso del agua.
- Enfermedades de origen hídricas.

Se estima en este marco, que al quinto año puede establecerse ya el régimen óptimo de caudal correspondiente a un año de humedad normal, es decir el caudal ambiental.

ANOTACIONES FINALES.

El Modelo Q-ESA establece en esencia unos rangos de valores, en los que los caudales residuales del uso del agua (sobre todo en periodos de estiaje) deben moverse, garantizando a su vez una variabilidad estacional e hiperanual que permita la sostenibilidad de la vida sistémica del ambiente ribereño. Así mismo cabe agregar que este caudal nunca deberá estar por debajo del Q_{ma} y por una duración mayor a los 15 días en el año, si se quiere garantizar la resiliencia. Estos rangos recogen así, más bien un rasgo específico del sistema ambiental: la sensibilidad frente a las variaciones de caudal, sensibilidad que puede calificarse de baja a media-baja cuando el promedio anual se mantenga en el Q_{EM} y de media-alta a alta cuando descienda hacia el promedio del Q_{EP} .

En este mismo orden de ideas, de ninguna manera la gama de valores debe interpretarse como un indicativo de que se está dentro de una franja de impactos *no significativos* por reducción de

caudal. El grado del impacto de los caudales adoptados debe analizarse y evaluarse para tener una dimensión de su magnitud. Desde este punto de vista se exige como mínimo analizar los impactos del caudal sobre los atributos en los que incide, como son los del deterioro de la calidad del agua, la alteración del paisaje, la afectación de las comunidades acuáticas (pues puede que se mantenga la comunidad de especies, pero que varíe su población) y la afectación al consumo humano, las costumbres y cotidianidad en el entorno social.

Estos impactos, según sean su importancia habrán de mitigarse, lo que podrá resolverse mediante medidas de ingeniería blanda, como un programa de manejo de caudal y/o una sencilla reorganización del ecosistema acuático del segmento afectado, o también mediante medidas de ingeniería dura como serían la construcción de escalas o canales para sostener procesos migratorios de la ictiofauna u otras aún más complejas.

Por último valdría preguntarse, cuál sería entre los valores encontrados, el mejor para un uso óptimo del caudal ecológico?. Esta pregunta tiene un fundamento racional toda vez que al reducirse el caudal de un río de forma artificial (aunque sea solamente en un pequeño segmento), se artificializa en los hechos el sistema ambiental ribereño del área de influencia y lo que se escurre por el cauce a partir del momento es agua con valor agregado, a la que habrá que darle un uso productivo (sea económico o ecológico) y ambientalmente sostenible. Sin esto no hay solución óptima para un caudal tan complejo en su determinación, como lo es definirlo bajo el efecto de las interacciones del propio ecosistema que lo rodea.

Actualmente el modelo está en proceso de validación, siendo aplicado con modelos de vertimiento incorporados a los diseños de ingeniería, por empresas hidroeléctricas que han dando con esto su apoyo para el seguimiento de la investigación.

Autores:

Manuel F. Zárate P., Matemático

Daly Espinosa, Hidróloga

Eduardo Flores, Físico