

P. Vásquez†

P. Guzmán‡

†Consejo Nacional de Electricidad - CONELEC

‡Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC E.P., Unidad de Negocio HIDROPAUTE

Resumen - Sin lugar a dudas la crisis energética de finales de 2009 e inicios de 2010, a más del costo que representó para el Estado ecuatoriano, ha sentado un claro precedente sobre la vulnerabilidad del sector eléctrico ante las incertidumbres presentes tanto en la severidad como en la duración de los períodos de estiaje.

Generalmente, las incertidumbres presentes en la predicción de caudales son sistemáticamente consideradas a través de una modelación probabilista-estocástica. No obstante, en la actualidad, nuevas incertidumbres hasta hoy omitidas, tales como los efectos del cambio climático, conducirían a desaciertos significativos en los pronósticos de los caudales. Bajo estas condiciones, la técnica de robustez -basada en probabilidades de excedencia-, utilizada para la toma de decisiones de inversión en generación, no garantiza adaptación entre oferta y demanda, ya que asume que la intensidad y duración futuras de los estiajes así como de la estación lluviosa obedecerán a un comportamiento histórico y por tanto no evolucionarán en el tiempo.

Al ser un fenómeno global, el Ecuador difícilmente escapará las consecuencias del cambio climático, de ahí que en este trabajo, se demostrará que tanto las hipótesis de estacionalidad (períodos lluviosos y estiajes) así como de evolución estática-estadística de los caudales en el tiempo -generalmente asumidas para estudios de planificación de la expansión de la generación- pudieran ser causales de la ineficacia en los pronósticos.

Palabras Clave - Adaptación, cambio climático, caudales, estadística, estocástico, excedencia, generación, hidrología, incertidumbres, planificación, probabilidad, riesgos.

1. VULNERABILIDAD EN LA OFERTA

La gran volatilidad de la oferta de energía eléctrica a lo largo del tiempo, es uno de los problemas más importantes a enfrentar dentro de la planificación de

la expansión de la generación en Ecuador. En efecto, las sequías extremas, que reducen dramáticamente los caudales que ingresan a las centrales de generación hidroeléctrica, han dejado vulnerable periódicamente al sistema eléctrico ecuatoriano. Durante dichos períodos, los niveles de reserva del sistema eléctrico ecuatoriano han sido alarmantes. Si a esto se suman las reducidas y extemporáneas inversiones en generación, las consecuencias más des-favorables han sido profundas y prolongados períodos de racionamientos.

Varias estrategias de decisión, tales como: la complementariedad hidrológica de las cuencas, la construcción de embalses y las inversiones en otras tecnologías de generación (renovable y no renovable), están siendo propuestas por los planificadores a fin de reducir, en el corto y mediano plazo, esta vulnerabilidad.

Sin embargo, estas estrategias han sido evaluadas y obtenidas asumiendo que el modelo estocástico, el cual utiliza Estadística Descriptiva (ED) para generar valores futuros de caudales medios mensuales, representa razonablemente -a lo largo del horizonte de planificación (10 años o más)- el complejo fenómeno de la hidrología. Es decir, se asume que las incertidumbres presentes en la magnitud y duración de los caudales medios de las diferentes cuencas en Ecuador, obedecen a un comportamiento histórico y, por tanto, no evolucionarán en el tiempo.

Con la hipótesis de que tales incertidumbres evolucionan en el tiempo debido a factores exógenos, tales como el cambio climático y la influencia humana, en el presente trabajo se evalúa la eficacia de la tradicionalmente aplicada ED, en la modelación de los caudales de Amaluza y Daule-Peripa.

2. EMBALSE AMALUZA

La Central Paute-Molino fue construida en dos fases: la fase AB de 500 MW de potencia, que opera desde 1983 y la fase C de 575 MW de potencia, que está en servicio desde 1992; juntas entregan al

Mercado Eléctrico una producción anual media de 4700 GWh.

La presa Daniel Palacios, la cual fue construida como parte de las obras de las fases A y B, da lugar al embalse Amaluza, con una capacidad de almacenamiento de 120 Hm³ y un volumen útil de 100 Hm³. El vertedero de excesos tiene una capacidad de descarga de 7724 m³/s.

Del embalse Amaluza se tiene una serie histórica de caudales medios mensuales en el Río Paute de 46 años, comprendida entre 1964 y 2009. El valor mínimo de 23.1 m³/s fue registrado en el mes de diciembre de 1968, y un valor máximo de 352.3 m³/s, en junio de 2007. En el ANEXO 1, se encuentra toda la muestra histórica considerada en este estudio, al igual que los valores: medios, máximos y mínimos mensuales históricos registrados.

A continuación se grafican los caudales medios anuales afluentes al embalse Amaluza, central Paute – Molino, donde se observa que los años 1966, 1968, 1979, 1981, 1985, 1992 y 1995 son los más críticos de caudales medios anuales con valores de 90.1, 89.4, 80.3, 81.2, 87.6, 81.0 y 79.7 m³/s respectivamente.

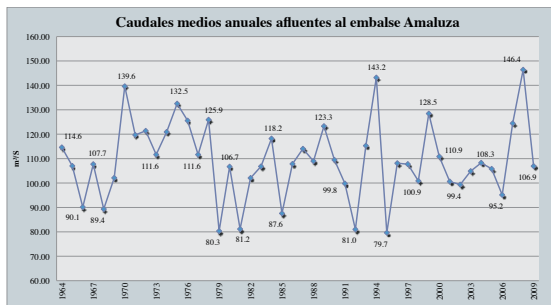


Figura 1: Caudales medios anuales Amaluza

El año 2009, en el que ocurrió la crisis energética, no aparece como uno de los años más críticos, es más, el caudal promedio anual (106,9) está más bien cercano al caudal promedio de la muestra para el período 1964-2008.

Sin embargo, al analizar los caudales medios mensuales, representados en la Fig. 2, se puede notar que: en los meses de enero, febrero, abril, mayo y junio, los caudales registrados en el año 2009 están por encima de los años históricamente más secos (1968, 1979 y 1995), mientras que en los meses restantes, están por debajo de los caudales registrados en el año 1968. En el mes de noviembre,

los caudales en el 2009 cayeron muy por debajo de los caudales sucedidos en los años 1968 y 1995, cambiando en diciembre el comportamiento con caudales inferiores a los registrados en 1979 y 1995.

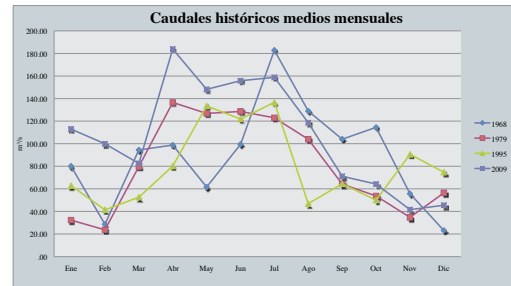


Figura 2: Caudales medios mensuales

Para verificar si las incertidumbres presentes en los caudales presentan algún tipo de evolución, se toman distintas muestras con mayor o menor cantidad de historia así veremos la que más se ajusta al comportamiento actual.

Muestra 1: 1964 – 2009, muestra 2: 1974 – 2009, muestra 3: 1984 – 2009, muestra 4: 1994 – 2009, muestra 5: 1999 – 2009, muestra 6: 2004 – 2009.

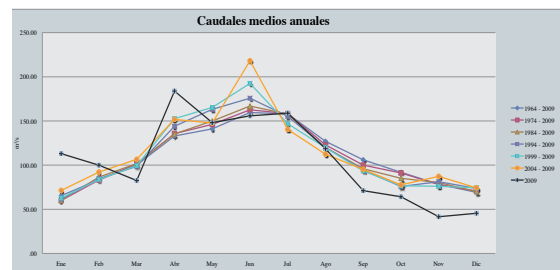


Figura 3: Caudales medios mensuales para distintas muestras, Embalse Amaluza.

En general, del gráfico anterior se puede observar que, entre enero y abril, la muestra 6 tiene los caudales medios anuales más altos de todas la muestras. En mayo, los valores descienden hasta ser iguales a los valores registrados en la muestra 2, en cambio para el mes de junio alcanza el pico más alto de toda la muestra, para descender nuevamente hasta octubre, mientras que en noviembre y diciembre tiene nuevamente los valores más altos.

Entonces, por un lado, el comportamiento mensual de los caudales, en el año 2009, estuvo por fuera de la media histórica en dos períodos -valores superiores

a la media en el mes de abril, y valores inferiores a la media en los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, y que, por otro lado, la hidrología del año 2009 se ajusta mejor a la muestra que utiliza menor historia, se concluye que: existe una evolución en la intensidad y en las duraciones de las dos estaciones climáticas. En efecto, se aprecia que las sequías, durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, son más extremas que en el pasado, y en los meses de abril, mayo y junio, la época lluviosa es más intensa que en el pasado.

3. EMBALSE DAULE-PERIPA

El embalse Daule Peripa tiene una serie histórica de caudales medios mensuales de 60 años comprendida entre 1950 y 2009. Con un valor mínimo de 0.4 m³/s registrado en el mes de septiembre de 2007, y un valor máximo de 1592 m³/s en abril de 1998.

En el siguiente gráfico, se muestran los caudales medios anuales afluentes al embalse Daule-Peripa - central Marcel Laniado.

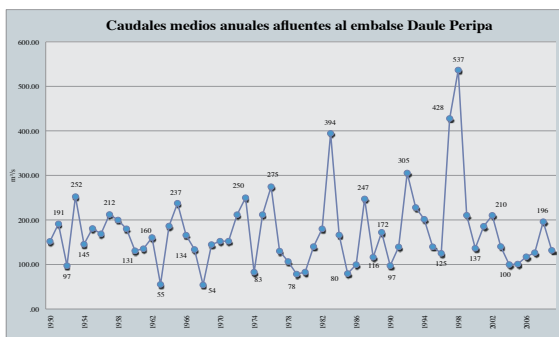


Figura 4: Caudales medios anuales, Daule Peripa

Del gráfico anterior se puede observar que los años más críticos en cuanto a caudales medios anuales afluentes al embalse Daule Peripa, se registran a los años 1952, 1963, 1968, y 1985.

Al igual que para el embalse Amaluza, se toman distintas muestras con mayor o menor cantidad de historia, así veremos la que más se ajusta al comportamiento actual.

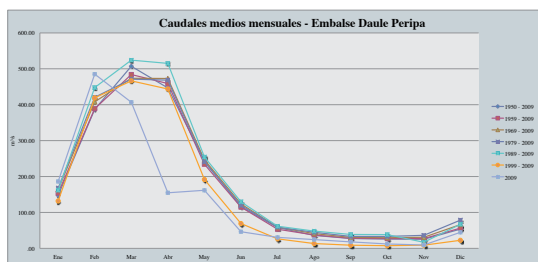


Figura 5: Caudales medios mensuales para distintas muestras, Daule Peripa

Muestra 1: 1950 – 2009, muestra 2: 1959 – 2009, muestra 3: 1969 – 2009, muestra 4: 1979 – 2009, muestra 5: 1989 – 2009, muestra 6: 1999 – 2009.

Del análisis de las distintas muestras (Fig. 5) se puede observar una tendencia muy similar en ellas, teniendo a la temporada de enero a mayo como la de mayores caudales y junio a diciembre con caudales menores, sin embargo el período 1999-2009 presenta 10 de los doce meses del año caudales inferiores, por otra parte es notorio que el año 2009 los caudales fueron inferiores durante todo el año a excepción de los meses de Enero y Febrero.

En el ANEXO 2, se encuentra toda la muestra histórica considerada en este estudio, al igual que los valores: medios, máximos y mínimos mensuales históricos registrados.

COMPLEMENTARIEDAD

Del análisis efectuado en las secciones anteriores se observa que la hidrología de Amaluza y Daule-Peripa son, en general, complementarias durante el período de enero a septiembre. Sin embargo, durante los meses de octubre a diciembre, no existe complementariedad, lo cual implica que la oferta de energía disminuye dramáticamente durante este período.

En la Fig. 6 se observa que la complementariedad hidrológica entre el embalse Amaluza de la central Paute – Molino y el proyecto Tortugo desaparece en los meses de octubre a diciembre.

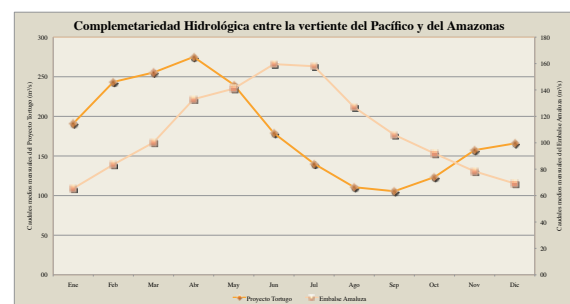


Figura 6: Complementariedad Hidrológica Paute – Tortugo

De ahí que, si bien planificar la expansión de la generación con el criterio de complementariedad reduce la vulnerabilidad de la oferta de generación durante un periodo significativo, existe un período de tres meses durante el cual el sistema eléctrico ecuatoriano sigue siendo vulnerable. Por tanto, es necesario que en la planificación se incorporen criterios adicionales para el manejo de este riesgo, tales como: incremento de la regulación

en la vertiente del Pacífico e incorporación de generación de energía renovable (geotérmica, fotovoltaica, eólica, etc.), en el largo plazo; y, en el corto plazo, alternativas de decisión flexibles tales como: generación térmica, generación distribuida, e incorporación de elementos FACTS.

4. INCERTIDUMBRE EN EL CAMBIO CLIMÁTICO

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, en el Artículo 1 ratifica como concepto de cambio climático al “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”, lo cual, desde el punto de vista de analizar el impacto en la disponibilidad del recurso hídrico y por tanto disponibilidad de energía hidroeléctrica, implica el conocimiento de las tendencias naturales o variabilidad natural del clima.

Bajo la premisa de que gran parte de la vulnerabilidad del sector eléctrico se encuentra en los bajos niveles de reserva de agua ante eventos extremos de sequía, es importante recalcar los hallazgos realizados por el Panel Inter-gubernamental para el Cambio Climático, IPCC por sus siglas en Inglés, con respecto al recurso hídrico (IPCC, 2008).

Los datos observados y las proyecciones proveen abundante evidencia de que los recursos hídricos (agua dulce) son vulnerables y poseen un alto potencial de ser fuertemente impactados por el cambio climático, con un amplio espectro de consecuencias para los seres humanos y ecosistemas, así:

- Cambios temporales y de magnitud en los ciclos hidrológicos, con probable realce de las crecidas con caudales mayores y de las sequías con caudales menores (Beninston, 2003).
- Cambios en la calidad del agua por el incremento de la temperatura.
- Pérdida de áreas naturales de reserva de agua, como son los glaciares. A lo anterior debe agregarse que en cuencas andinas como la del Paute existe la probabilidad de que las zonas de páramo cuyo suelo y vegetación regulan de manera natural los caudales manteniendo el flujo durante los tiempos de sequía, también disminuyan su área por el movimiento ascendente de las fronteras de los ecosistemas, impulsados

también por el incremento de la temperatura (IDEAM, 2001). En el caso del reservorio de Amaluz se estima que entre el 20 y 40% del agua que llega al reservorio tiene su origen en los páramos y bosques altoandinos de las cordilleras Oeste y Central. En períodos secos, sin embargo, podría alcanzar 100% (Buytaert et al. 2008).

En un análisis de las distintas muestras de la Fig. 3 se puede notar un acentuamiento de los extremos, (caudales en el año 2009 de los meses enero, febrero y abril se presentan más altos y los de septiembre a diciembre los más bajos) siendo un indicio de la tendencia esperada como consecuencia de cambio climático, adicionalmente se nota claramente en los hidrogramas de caudales variaciones que dan cuenta de un fenómeno dinámico en el tiempo con variaciones de más del 50% en épocas similares de años distintos.

Con respecto al cambio de temperatura, en la cuenca del río Paute se prevé un incremento decenal de 0,28 °C (PACC, 2009) y aproximadamente 0,2 °C para Daule, esto implica un impacto en la disponibilidad de agua por el incremento en la evapotranspiración y el cambio de humedad del suelo, además que para los cuerpos de agua como el embalse de Daule, Mazar y Amaluz, significa un incremento en el crecimiento de vegetación acuática, que podrían causar restricciones en la movilidad y por ende dificultades operativas con respecto a actividades como el dragado o problemas de eutrofización.

Se plantea claramente un impacto de nuevas variables en la forma de concebir la disponibilidad futura de los recursos hídricos y por ende, de los servicios relacionados, como es la producción de energía hidroeléctrica, que para el caso del Ecuador se encuentra estrechamente ligada tanto al plan de expansión del sistema nacional como a la operación del mismo.

5. DISCUSIÓN

Cuando se analiza el hidrograma de caudales mensuales correspondiente al año 2009 a juzgar por los meses iniciales y hasta el mes de julio se esperaría un año normal en términos estadísticos, sin embargo, a partir del mes de septiembre los caudales tuvieron valores totalmente inferiores a los esperados y predecibles de acuerdo a las tendencias, lo cual muestra una marcada vulnerabilidad en la consideración meramente estadística del fenómeno, por lo que se vislumbra un cambio de paradigma en el tratamiento de la variable caudales.

En primera instancia es necesario conocer a cabalidad las tendencias de cambio a lo largo del tiempo en las series disponibles, identificando las oscilaciones, para lo cual se puede aplicar técnicas basadas en la extracción de extremos en las series, cálculo de las probabilidades de excedencia y análisis de cómo extremos con la misma probabilidad varían en el tiempo (Ntegeka & Willems, 2008).

Lo anterior permitirá profundizar en el conocimiento de las desviaciones y su recurrencia, sin embargo es necesario mejorar el entendimiento de los efectos específicos de las futuras afecciones de cambio, tanto en el aspecto climático como por aspectos degradativos en las cuencas de interés. Ello configurará escenarios de mayor claridad para disminuir la incertidumbre y optimizar la implementación y operación de los sistemas hidroeléctricos.

Cabe notar que en términos de volumen total (ver Fig. 7), el año 2009 con 3371,7 Hm³ no representa uno de los años más críticos, habiéndose registrado en la serie analizada al menos 16 años con menor volumen de agua, así el volumen 2009 está muy próximo al volumen medio anual calculado para la serie 1964-2009 de 3454 Hm³.

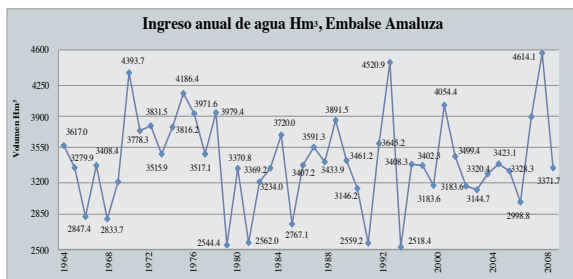


Figura 7: Ingreso anual de agua Hm³, embalse de Amaluzá

Por las tendencias globales se espera períodos de sequías de mayor duración y menor caudal (Beninston, 2003; Urrutia and Vuille, 2009), no obstante los balances anuales permanezcan en los rangos promedio conforme ocurrió en el año 2009 (ver Fig. 7), aquello implicaría replantear las premisas y métodos de planificación del sector eléctrico, tanto para la implementación, tipo de tecnología y complementariedad de las centrales, así como profundizar el conocimiento de los sistemas hídricos individuales tal que se pueda mejorar la predicción en el corto, mediano y largo plazo, incrementando la eficiencia en el uso del recurso hídrico y la resiliencia del sistema eléctrico ecuatoriano con respecto a los cambios dinámicos que afectan el clima.

El período estimado para extremos de escasas de

lluvia es de 2,5 meses (PACC, 2009), similar al de regulación para el embalse de Mazar, sin embargo cabe notar que la estimación específica de escenarios para la Cuenca del Paute aún está a una escala muy gruesa y hasta cierto punto cualitativa antes que cuantitativa, calculado sobre una grilla de 25 x 25 km.

El reto de la planificación no solamente se plantea como la oportunidad de incorporar nueva infraestructura para enfrentar con solvencia el crecimiento de la demanda y sobrellevar la vulnerabilidad propia del SNI, ahora también se avizoran variables antes no consideradas, con el riesgo de incrementar la vulnerabilidad del lado de los eventos naturales.

Ante los efectos del cambio climático se plantea la adaptación, siendo el primer gran paso el reconocimiento y la valoración del problema. Es probable que con acciones como la conclusión del proyecto Mazar, el sector eléctrico ecuatoriano, involuntariamente se esté adaptando al cambio climático, sin embargo existen aún mas incertidumbres que certezas, las cuales deberán ser estudiadas y cuantificadas, a fin de realizar acciones que coadyuven a una mayor efectividad en la planificación, optimizando el tiempo y recursos necesarios para enfrentar los cambios.

AGRADECIMIENTO

Se agradece al Consejo Nacional de Electricidad, CONELEC y CELEC EP Unidad de Negocio Hidropaute por brindar las facilidades tecnológicas y físicas para llevar a cabo este trabajo.

Se expresa un agradecimiento al Sr. Diego Salinas, técnico de la Dirección de Planificación del CONELEC, por haber colaborado en la elaboración de este documento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Laboratorio experimental SNI.
- [2] Beninston M (2003). Climate change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climate Change* 59, 5-31.
- [3] Buytaert W, Célleri R, De Bievre B, Cisneros F, Hofstede R, 2008. Impacto humano en la hidrología de los páramos andinos. Universidad de Cuenca, 65 p.
- [4] Buytaert W, Deckers J, Dercon G, De Bievre B, Poesen J, Govers G. 2002. Impact of land

use changes on hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador. *Soil Use and Management* 18:94-100.

[5] Buytaert W, Vuille M, Dewulf A, Urrutia R, Karmalkar A, Celleri R. 2010. Uncertainties in climate change projections and regional downscaling: implications for water resources management. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 7, 1821-1848.

[6] Celleri R. 2007. Rainfall variability and rainfall runoff dynamics in the Paute River Basin, southern Ecuador. K.U.Leuven, Faculty of Engineering, Doctoral dissertation, 144 p.

[7] Gleik P. 2000. Informe del Equipo de Evaluación del Sector Hidráulico sobre las consecuencias potenciales de la variabilidad y el cambio climático. Pacific Institute for studies in development, environment and security. 19p. [1]

[8] IDEAM, 2001. Colombia, Primera comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. IDEAM, Bogota.

[9] IPCC, 2008, Technical Paper on Climate Change and Water.

[10] Ntegeka V., Willems P. (2008). Trends and multidecadal oscillations in rainfall extremes based on a more than 100 years time series of ten minutes rainfall intensities at Uccle,

Belgium. *Water Resour. Res.* 44, W07402, doi: 10.1029/2007WR006471.

[11] Proyecto Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en el Ecuador (PACC), 2009, Ministerio del Ambiente del Ecuador. 164 p.

[12] Urrutia R., Vuille M. (2009). Climate change projections for tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century, *J. Geophys. Res.*, 114, D02108, 2009.



Paúl F. Vásquez Miranda,
Consejo Nacional de
Electricidad, CONELEC –
Director de Planificación.



**Pablo Ismael Guzmán
Cárdenas,** Jefe De Gestión
Ambiental Y Responsabilidad
Social en la Corporación
Eléctrica del Ecuador – Unidad
de Negocio Hidropaute..