



Sociedad Colombiana  
de Ingenieros



Sociedad Tolimense  
de Ingenieros

**XXIII Seminario  
Nacional  
DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA**

## **NORMAS PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS XXIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA IBAGUÉ, 15 AL 17 DE AGOSTO DE 2018.**

### **EVALUACIÓN ASCENDENTE DE LA VULNERABILIDAD DE LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA EN LA CUENCA DEL RÍO MAGDALENA.**

*Santiago Gómez Dueñas<sup>1</sup>, Kristin Gilroy<sup>2</sup>, Berry Gersonius<sup>1</sup>, Michael McClain<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Department of Water Science and Engineering, IHE Delft Institute for Water Education, PO Box 3015, 2611 AH, Delft, The Netherlands. Email: santiagoomezd@gmail.com

<sup>2</sup> United States Army Corps of Engineers. International Centre for Integrated Water Resources Management (ICIWaRM): Institute for Water Resources, 7701 Telegraph Road, Alexandria, VA 22315 USA.

#### **RESUMEN:**

Ingenieros y tomadores de decisiones enfrentan incertidumbres significativas en el manejo y planeación de los recursos hídricos como resultado del cambio climático. Mientras la disponibilidad de datos sobre el cambio climático incrementa, hacen falta guías para interpretarlos y comunicar su incertidumbre para tomar decisiones. Este estudio de caso pretende abordar esta necesidad. El estudio demuestra el uso de datos climáticos en toma de decisiones mediante la aplicación de la metodología “Decisiones Colaborativa e Informada del Riesgo” (CRIDA por sus siglas en inglés) al sector hidroenergético en la cuenca del río Magdalena en Colombia. La sensibilidad del sistema es evaluada frente al cambio climático en comparación con otros factores naturales como variabilidad climática y sedimentación, con el fin de determinar cuál es la mayor amenaza para el sistema. Se determinó que el cambio climático es la mayor amenaza y las opciones para planeación son discutidas. Como resultado de este trabajo, los ingenieros tienen un ejemplo de aplicación del método CRIDA y cómo comunicar riesgos y sus implicaciones a los tomadores de decisiones.

#### **ABSTRACT:**

Engineers and decision makers face significant uncertainties in water resources management and planning as a result of climate change. While the availability of climate data is increasing, guidance for interpreting these data and communicating the uncertainty for decision making is lacking. This case study aims to address this need. The study demonstrates the use of climate data in decision making by applying the “Collaborative Risk Informed Decision Analysis” (CRIDA) method to the hydropower sector in the Magdalena River Basin of Colombia. The sensitivity of the sector to climate change versus other natural drivers, including climate variability and sedimentation, is evaluated, with the goal of determining whether or not climate change is indeed the main threat to the system. After determining that climate change is indeed the main threat, planning options are discussed. As a result of this work, engineers will have an example application of the CRIDA method and how to communicate climate risks and their implications to decision makers.

**PALABRAS CLAVE:** *CRIDA, Análisis LOC, evaluación de vulnerabilidad, test de estrés.*

Mayor Información

Comisión Técnica Permanente  
de Ingeniería de Recursos Hídricos

57 (1) 5550520 @logistica@sci.org.co



## INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa un reto clave para el desarrollo social y económico sustentable. Sin embargo, los tomadores de decisiones enfrentan algunos problemas al momento de entender y dar una respuesta efectiva a dichos retos. De hecho, esos cambios implican condiciones no estacionarias en el sistema climático que afectan enormemente los procesos para toma de decisiones del sector público y privado, trayendo a la ecuación un incremento en la incertidumbre de Modelos Climáticos Globales (GCMs por sus siglas en inglés) y nuevos escenarios climáticos. Es entonces necesario entender mejor cómo estructurar mejor las decisiones tomadas. Enfrentar esas incertidumbres no es tarea fácil, especialmente porque no hemos lidiado con algo similar antes. Es un problema complejo con consecuencias dentro de diferentes horizontes de tiempo, caracterizados por la incertidumbre y el riesgo. No obstante, ese es el principal objetivo: tomar el riesgo de una estrategia resiliente al clima. Más aún, es deber unir a la ciencia, la política y sus herramientas de gestión; ello implica entender de primero su interacción y así, construir metodologías en las cuales cada ámbito mencionado pueda contribuir desde sus responsabilidades y perspectivas (UNESCO, 2016)

La toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico requiere involucrar riesgos e incertidumbres en contexto para tener una idea clara del sistema y sus implicaciones en él. Esto garantiza un mejor entendimiento del sistema, aceptar los rangos dentro de los que la incertidumbre varía y el riesgo que implica un futuro escenario climático diferente a los que hemos conocido (Middelkoop, H et al., 2004). De esta forma, si gestores del recurso hídrico continúan aplicando metodologías prácticas para los retos en cada uno de los pasos que comprende la toma de decisiones, incluyendo condiciones climáticas no estacionarias, entonces no deben subestimar las incertidumbres que les son intrínsecas. En ese sentido, si una metodología está disponible involucrando dichos componentes, especialmente la incertidumbre, debe permitir revisar los pasos de la planeación adicionalmente y así, reformular acciones de ser necesario para rechazar un desempeño indeseable, ya sea presente o esperado (USACE; Deltares, 2016).

Al partir de una configuración estacionaria del clima como principio en la toma de decisiones, las incertidumbres se evitan y esto simplifica el problema. Sin embargo, debe ser resaltado que la mayoría de ideas de gestión de recurso hídrico que conllevan un mejor conocimiento hidrológico son relativamente recientes (menos de 20 años) y que conceptos como tendencias, incertidumbres, presiones en el recurso, etc., han sido desarrollados con base en las comparaciones del clima actual con el pasado y el proyectado a futuro (USACE; Deltares, 2016). Ese principio equivale al método tradicional de planeación, conocido como enfoque descendente. El enfoque ascendente por su parte en un método novedoso que, aunque inicia su análisis de la misma forma que el descendente (1 - Identifica vulnerabilidades, 2 – Acepta la variabilidad climática natural, 3 – busca impactos clave y posibles estresores del sistema que preocupen y 4 – identifica la participación de distintos actores a lo largo de diferentes etapas), éste no busca una valoración determinística de las incertidumbres; en cambio, este enfoque da un marco analítico útil para tomadores de decisiones para identificar el impacto de las incertidumbres, las cuales son importantes para su perspectiva y cómo es el sistema sensible a ellas, considerando el rango total dentro del cual la información climática se encuentra (Brown, 2011).

Entonces, existe un marco capaz de lidiar con las actuales necesidades de los tomadores de decisiones y provee un enfoque diferente al paradigma tradicional denominado: Toma de Decisiones Colaborativa e Informada del riesgo (Collaborative Risk Informed Decision Analysis – CRIDA). CRIDA se desarrolló para responder aquellas necesidades: proveer la mejor percepción siendo consciente de las incertidumbres, así como buscar la decisión más efectiva e informada para la gestión de recursos hídricos (Mendoza et al. 2018). El método depende de la evaluación de vulnerabilidad a

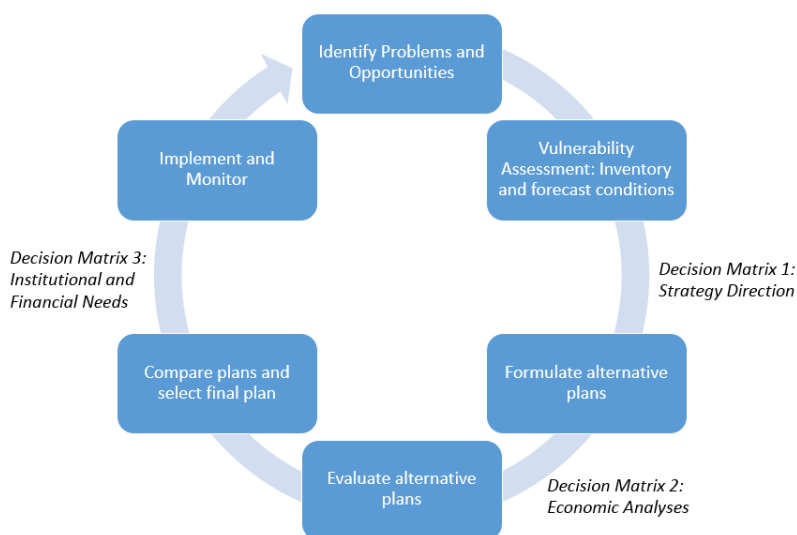
Mayor Información

múltiples factores dinámicos que pueden cambiar las condiciones al momento de tomar las decisiones, tales como cambios en el ciclo hidrológico, crecimiento poblacional, cambios en el uso del suelo, etc. Así mismo, CRIDA provee un análisis de los riesgos e informa a los tomadores de decisiones sobre ellos, significando esto que CRIDA reconoce las implicaciones de la toma de decisiones cuando la gestión se basa en métricas basadas en riesgo bajo condiciones no estacionarias.

Mientras la metodología CRIDA es un punto de inicio para mejorar la guía para ingenieros y tomadores de decisiones a la hora de planear el recurso hídrico, existen estudios de caso disponibles como ejemplos que demuestran que los conceptos de CRIDA son limitados (Gilroy and Jeuken 2018). El objetivo de este trabajo es mostrar a los lectores el vínculo entre evaluaciones de vulnerabilidad climática y las matrices de toma de decisiones de CRIDA y así, la planeación de recursos hídricos bajo incertidumbre. Este estudio de caso añade a la evaluación de vulnerabilidad previamente realizado al sector de la hidroenergía en la cuenca del río Magdalena (Gomez-Dueñas et al. 2019). A través de ejemplos, tal y como este estudio de caso, ingenieros y tomadores de decisiones estarán mejor calificados en la incorporación de incertidumbres, tales como cambio climático, al proceso de toma de decisiones para planeación del recurso hídrico a través del método CRIDA.

## METODOLOGÍA

El método CRIDA sigue el ciclo tradicional de planeación, tal y como se presenta en la Figura 1, e inserta matrices guía en tres de sus pasos, que se explicarán más adelante. La idea es proveerle al analista una guía sobre la dirección de sus estrategias (i.e. robustas o flexibles), análisis económicos, así como también requerimientos institucionales y financieros para su implementación. La guía apunta a personalizar la planeación basado en la vulnerabilidad del sistema a incertidumbres climáticas. Provee además mecanismos para comunicarle a los tomadores de decisiones las implicaciones de la incertidumbre.



**Figura 1.-** Traditional Water Resources Planning Cycle with CRIDA Decision Matrices (Gómez-Dueñas et. al, 2018)

Adicionalmente a las Matrices de Decisión, la evaluación de vulnerabilidad de CRIDA se desvía de la planeación tradicional siguiendo el enfoque del test de estrés. A través de un test de estrés, se evalúa el desempeño del sistema usando valores de factores naturales tales como precipitación, que van más allá de los observados o proyectados. Dada la alta incertidumbre en los datos disponibles, este enfoque permite al analista un mejor entendimiento de la vulnerabilidad del sistema a dichos factores

Mayor Información

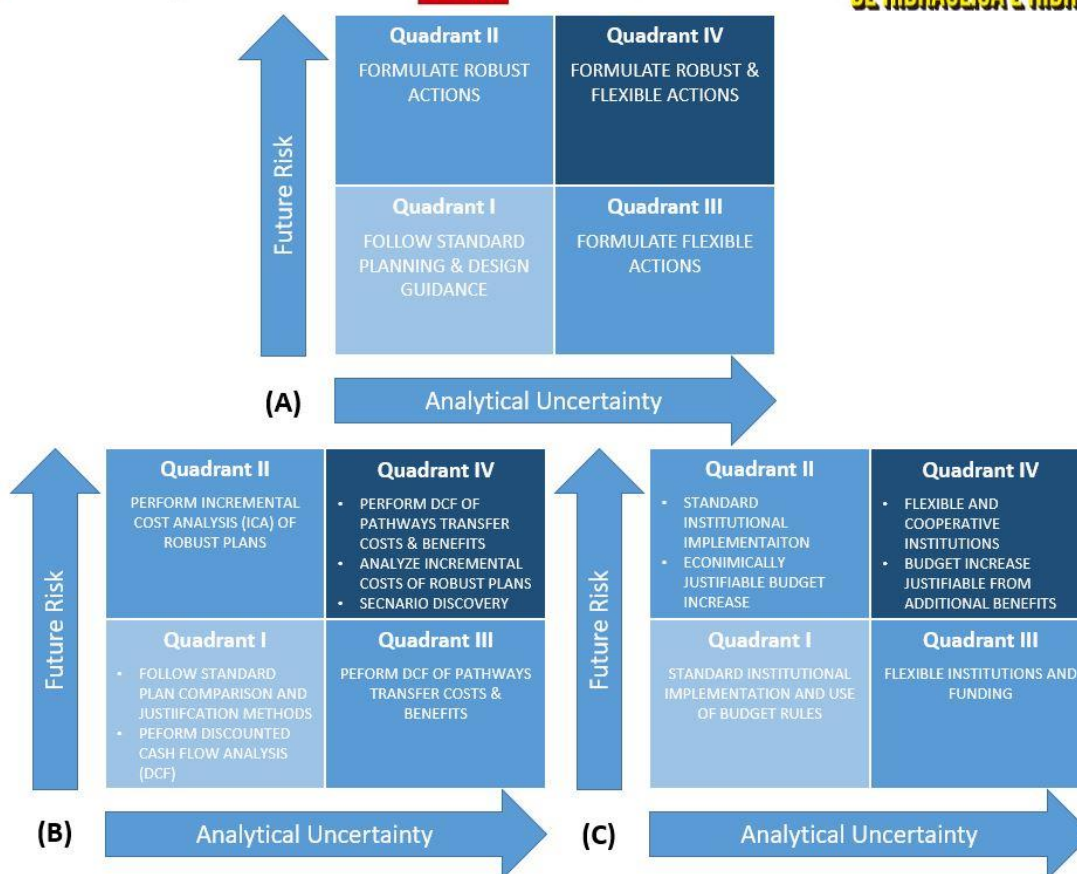


antes de limitar el rango de valores evaluados. El análisis del Nivel de Preocupación (Level of concern Analysis LOC) usa los resultados del test de estrés para determinar 1) plausibilidad de entrar a un estado vulnerable o pasar un umbral definido en el desempeño del sistema durante el horizonte de planeación, 2) las consecuencias de estar en dicho estado vulnerable y 3) la incertidumbre analítica de los datos usados para dicha evaluación. El análisis LOC provee el vínculo entre el test de estrés y las Matrices de Decisión.

Las consecuencias de un rendimiento inaceptable del sistema usualmente se definen con base en la afirmación de un problema u oportunidad. En general, las consecuencias concernientes a proyectos de suministro de agua son menos severos que problemas por manejo de inundaciones, ya que ellas ocurren rápidamente en tiempos de respuesta muy cortos. De la misma forma, riesgos urbanos por inundaciones lidian con pérdidas humanas mientras que riesgos por inundaciones en el agro son más manejables a través de medidas tales como seguros. Para hidroenergía, si una fuente alterna de energía no está disponible, las consecuencias por falla en el sistema serían mucho mayores que si se tiene un plan de contingencia disponible. El analista debe considerar estos elementos a la hora de asignar un bajo, medio o alto nivel de consecuencias del problema. Si múltiples proyectos son evaluados de manera simultánea, será beneficioso en ocasiones reportar dichas evaluaciones en términos relativos transversalmente en los proyectos.

En cuanto a la plausibilidad, el analista deberá evaluar cuán factible es que el sistema vaya a tener un rendimiento inaceptable durante un horizonte de tiempo definido basado en toda la información y datos disponibles. Usualmente, el sistema ya está fallando, por lo que se convoca el proyecto. En este caso, el analista está evaluando cuán sensible es el sistema a los factores, de tal forma que determine cuán importante es la incertidumbre en la toma de decisiones. ¿Podemos planear únicamente usando datos observados y sentirnos confiados en el rendimiento del sistema?, o ¿deberíamos considerar planes flexibles como rutas adaptables (adaptation pathways), o planes más robustos que sean diseñados para un futuro clima?

El analista puede evaluar la plausibilidad mediante la respuesta a las siguientes preguntas: 1) ¿sugiere el test de estrés que el cambio en una métrica climática es el factor más sensible? Si no, entonces los factores con menor incertidumbre son de mayor preocupación y su plausibilidad es baja; los enfoques tradicionales de planeación basados en datos observados serían los apropiados en dicho caso. Si sí, entonces 2) ¿Los datos observados sugieren un cambio en dirección a un clima más vulnerable? Y 3), ¿los datos proyectados sugieren ir en dirección a clima más vulnerable? Entre más datos sugieran un desplazamiento hacia un clima más vulnerable, mayor el puntaje de plausibilidad. La combinación de Consecuencias y Plausibilidad provee al analista de una clasificación alta, media y baja de futuros riesgos, que corresponde al eje Y de las Matrices de Decisión. Por otra parte, evaluar la incertidumbre analítica lleva a determinar la fiabilidad de los datos sobre los cuales se toman las decisiones. Si por ejemplo la mayoría de GCMs no están en acuerdo, entonces la incertidumbre analítica es alta para proyecciones futuras. Las evaluaciones de baja, media o alta incertidumbre analítica ponen al problema a recorrer el eje X de las Matrices de Decisión, con una alta incertidumbre analítica llevándonos hacia estrategias más adaptables. Como resultado del análisis del nivel de preocupación, el ingeniero o analista estará en capacidad de ubicar el problema en uno de los cuatro cuadrantes de las Matrices de Decisión de CRIDA, que se presentan en la **Figura 2**.



**Figura 2.-** Matrices de Decisión: (A) Dirección estratégica (B) Análisis económicos (C) Requerimientos institucionales y financieros (Gómez-Dueñas et. al, 2018)

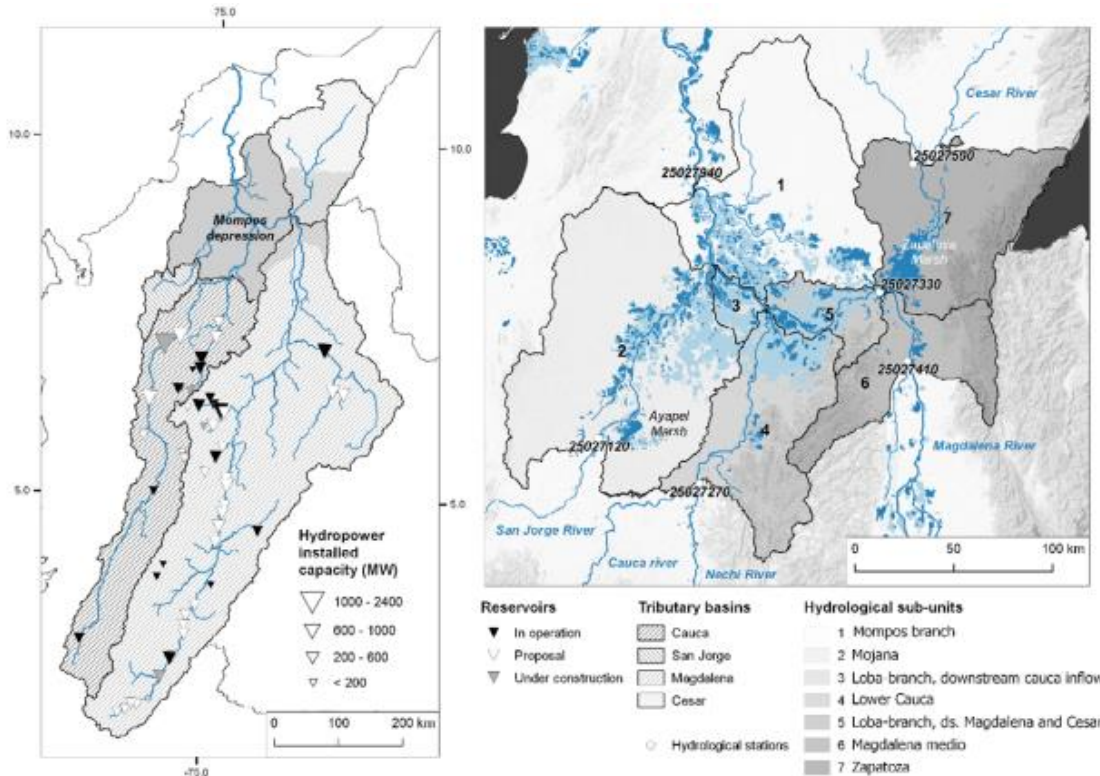
Las Matrices de Decisión guían al analista o ingeniero a través del desarrollo de direcciones estratégicas que mejor se ajustan al problema, así como también el análisis económico, junto con sus requerimientos institucionales y financieros para implementar el plan desarrollado (Mendoza et al. 2018). Como se mencionó anteriormente, este artículo se concentra en el Análisis del Nivel de Preocupación basado en una Análisis de vulnerabilidad, previamente realizado para el sector hidroenergético en la cuenca del río Magdalena. Debido a que estos análisis contienen un alto nivel de subjetividad, ejemplos como este estudio de caso serán un soporte crítico para los analistas e ingenieros que requieran considerar incertidumbres tales como el cambio climático en la planeación del recurso hídrico

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La hidroelectricidad es la fuente principal de energía en Colombia y ha posicionado estratégicamente al país como referente en términos de generación para Latinoamérica (Foro Nacional Internacional, 2012). El país aprovecha su posición geográfica, condiciones topográficas y disponibilidad del recurso hídrico para la generación, fundamentada en una matriz de energía limpia, dejando combustibles fósiles más como un sistema de respaldo que fuente primaria. Adicionalmente, hay planes de actualizar la infraestructura actual con algunos trabajos que permitan ampliar los caudales de entrada a los embalses (ACOLGEN, 2012) debido a rendimientos más bajos de lo esperado (Mariño, 2007). En consecuencia, Colombia ha estado buscando incrementar la inversión en el sector hidroeléctrico para cumplir las metas de generación propuestas. La mayoría de esa nueva

Mayor Información

infraestructura será ubicada sobre la cuenca del Magdalena, tal como se presenta en la **Figura 3**. La cuenca del río Magdalena es la más importante del país, cuya área equivale a un cuarto del territorio nacional y el río con una longitud es de 1.612 Km es la principal rama fluvial de Colombia (**Restrepo J., 2000**).



**Figura 3.-** Infraestructura actual proyectada en la Cuenca del río Magdalena (Angarita H. *et al.*, 2015)

La región tropical de Suramérica está influenciada por las fases extremas del Fenómeno del Niño (ENSO por sus siglas en inglés), que afectan primeramente las condiciones hidroclimatológicas interanuales, lo que ha sido soportado en diversos estudios (**Restrepo, 2000**). No obstante, si bien varios estudios llevados a cabo se han concentrado en la variabilidad interanual y los efectos del ENSO en el régimen de lluvias y caudales, el Magdalena ha recibido atención escasa y los impactos sobre su cuenca permanecen aún desconocidos, añadiendo los bien conocidos efectos del cambio climático. Adicionalmente, la cuenca es naturalmente susceptible a fenómenos erosivos (**Restrepo *et al.*, 2006**), siendo la orografía el mayor controlador. La tasa de sedimentación varía de manera paralela al régimen de lluvias y siendo un régimen de lluvias no estacionario el considerado, indica que la tasa de sedimentación también lo será. Más aún, como muchos de los embalses están ubicados en la cuenca alta, ellos actúan como una trampa de sedimentos y su influencia es considerable en sus afluentes; sin embargo, como se retiene el sedimento en los embalses, su almacenamiento se reduce y por consiguiente, la energía generada.

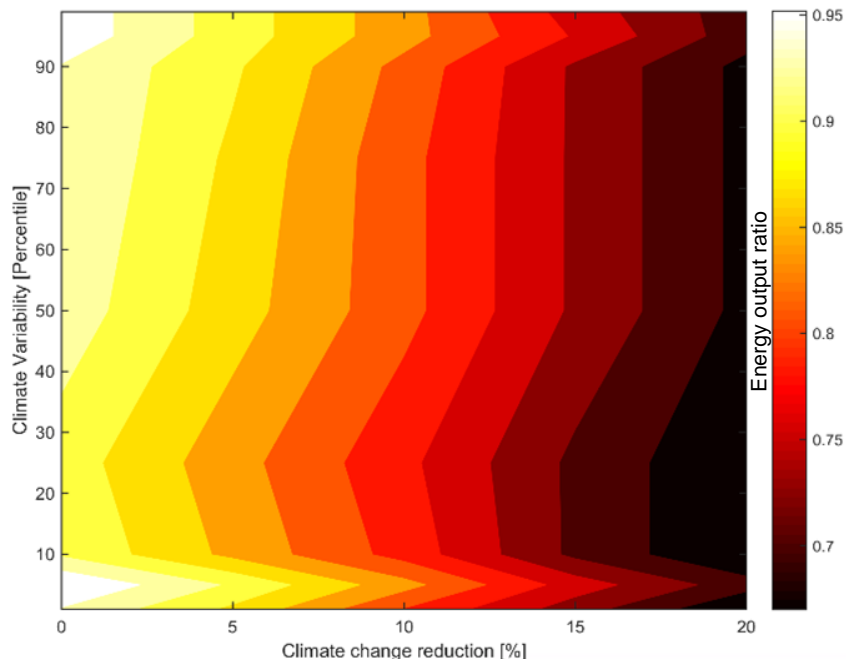
Es útil saber cuándo el sistema falla basado en los factores externos mencionados arriba: cambio climático, variabilidad climática y retención de sedimentos en el embalse. Se llevó a cabo una evaluación de la vulnerabilidad variando esos parámetros así comparar resultados y determinar a qué factor es más sensible el sistema. Si los test de estrés indicasen que el factor principal no es el cambio climático por ejemplo, los procesos de planeación y toma de decisiones serían simplificados de sobremana. De lo contrario, las matrices LOC podrían ser usadas de guía para llevar al analista a lo

largo del proceso.

### Resultados del Test de Estrés:

Como se mencionó previamente, una explicación más profunda de la metodología Test de estrés se encuentra en (Gomez-Dueñas *et al.* 2019). El objetivo de esta investigación es demostrar la interpretación de dichos resultados para la toma de decisiones. Éstos se presentan en la Figura 4 y Figura 5 para factores climáticos y de sedimentos respectivamente. En la Figura 4 se presenta la superficie de respuesta, con el eje X representando cambio climático y el eje Y variabilidad climática. El cambio climático fue representado mediante una disminución porcentual de la precipitación media mensual del registro de referencia (1970-2013) para representar un clima más seco. Por su parte, la variabilidad climática fue simulada mediante un *bootstrap* del registro de referencia y así explorar la sensibilidad del sistema a la precipitación observada con diferentes frecuencias. Por ejemplo, si la sequía más severa ocurre múltiples veces durante el periodo de registro, ¿cómo cambiaría el rendimiento del sistema? 10.000 muestras fueron generadas mediante *bootstrap* y agrupadas en percentiles basados en la severidad de la sequía para cada muestra generada. La barra de colores representa la **razón de energía**, que equivale al resultado de generación energética de la modelación para cada escenario sobre la energía generada para el escenario de referencia, indicando el color claro el no cambio en la medida que se oscurece, una disminución en la generación, que llega a ser de alrededor del 30 %.

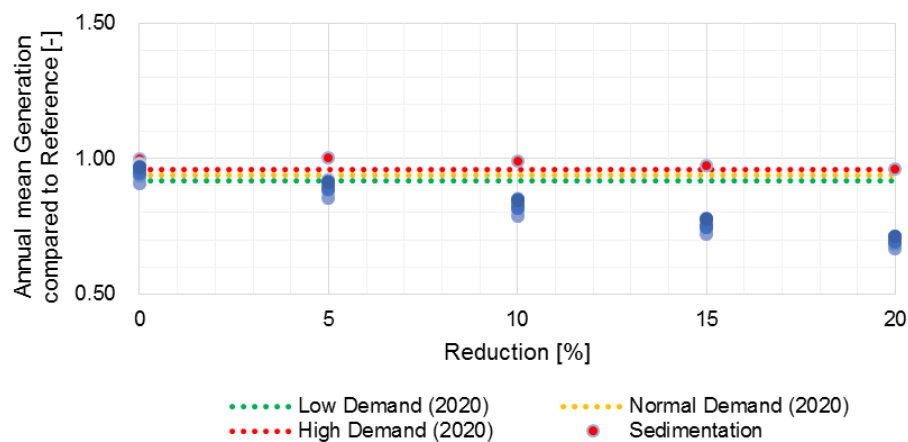
Elegir un punto cualquiera dentro de la superficie de respuesta representa la razón de energía resultante de la combinación de un escenario de cambio climático (eje X) y la variabilidad climática (eje Y). Una comparación del cambio de tonalidades en sentido horizontal y vertical indica que el sistema es más sensible a los rangos de cambio climático que a los escenarios de variabilidad climática. Esto indica que el cambio climático es el principal factor natural entre los dos y que no debe ser ignorado ni en la toma de decisiones, ni durante el proceso de planeación. No obstante, esta conclusión depende de la plausibilidad de los rangos seleccionados para cambio climáticos. Esto se evalúa mediante la matriz LOC.



Mayor Información

**Figura 4.-** Test de Estrés climático – Método medio anual (Gómez-Dueñas et. al, 2018)

El siguiente paso en la fase del test de estrés fue comparar cambio climático (el principal factor dentro de las variables climáticas) con la sedimentación, ilustrado en la **Figura 5**. El eje x se refiere a la reducción en cada factor en un rango de 0 a 20%. Para la serie de datos con puntos rojos, esta reducción se refiere al del almacenamiento en el embalse como consecuencia de la sedimentación y su consecuente aumento en el volumen muerto. Para la serie de datos con puntos azules, esta reducción se refiere a los diferentes escenarios de cambio climático del primer test de estrés, en combinación con los valores para variabilidad climática en los diferentes percentiles. Para poder visualizar los resultados comparados con un umbral, se trazaron los escenarios de baja, media y alta demanda energética para el año 2020. Nótese que valores de demanda proyectados para años posteriores superan significativamente la razón de energía de los presentados en la Figura, por lo que indica que el sistema estaría fallando para alcanzar las demandas del año 2020.



**Figura 5.-** Test de estrés entre factores naturales. Metodología media anual (Gómez-Dueñas et. al, 2018)

El test de estrés de sedimentación indica que los factores climáticos tiene una razón de energía menor que la retención de sedimentos. En el peor escenario posible para la retención de sedimentos, los valores están por debajo un 6% comparado con el caso de Referencia, mientras que los factores climáticos para la misma reducción (20%) muestran una diferencia den entre el 31 al 37%, casi 5 veces menor. Para otros porcentajes de reducción (0 a 15%), el rendimiento es aceptable, inclusive para el escenario de mayor demanda energética. Por consiguiente, basado en los resultados y comparando las diferentes vulnerabilidades del sistema, se puede concluir que el principal factor natural es el cambio climático sobre la retención de sedimentos. Nuevamente las conclusiones dependen enteramente de la plausibilidad del rango analizado para cambio climático, el cual debe ser analizado en las matrices LOC.

### Evaluación de la plausibilidad

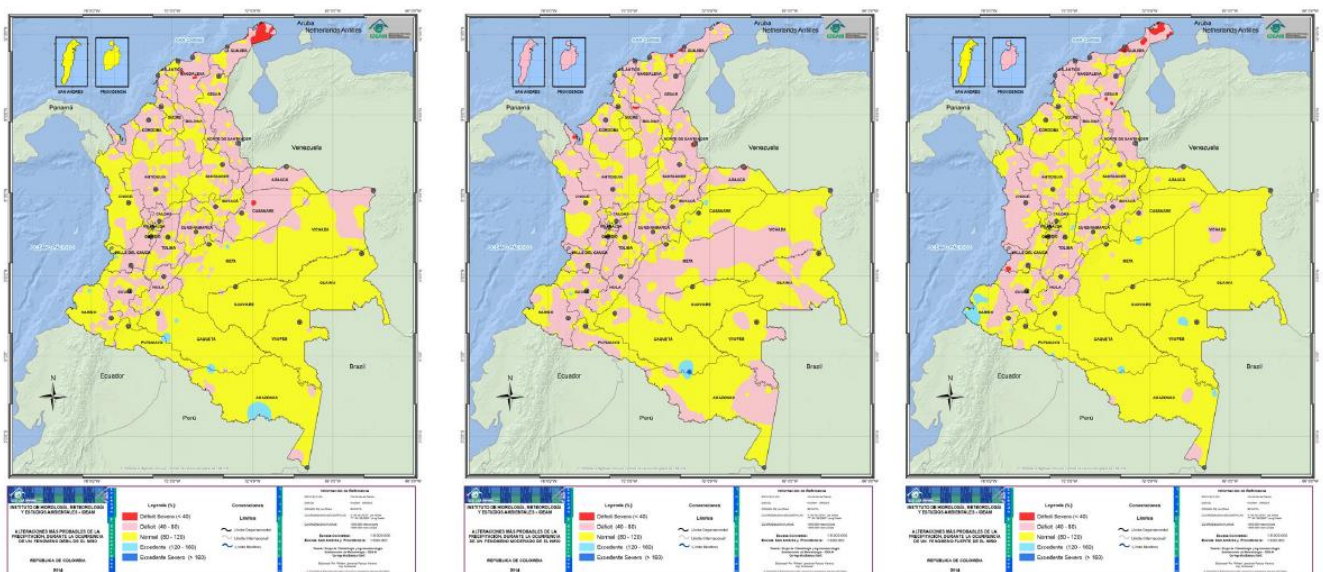
El objetivo del análisis LOC es el de evaluar el futuro riesgo y la incertidumbre analítica del problema en mano para seleccionar uno de los cuadrantes de toma de decisiones en la matriz. La evaluación preliminar del test de estrés indica que el cambio climático es la mayor variable que conduce a una vulnerabilidad del sistema. Mediante la evaluación de los rangos de plausibilidad

Mayor Información



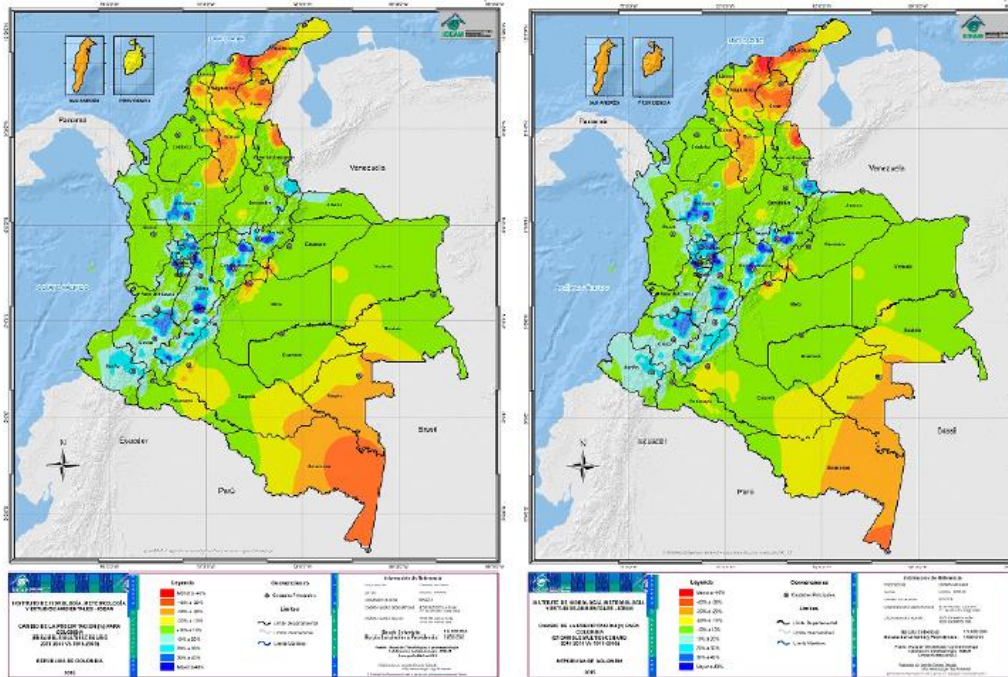
analizados, una valoración del riesgo futuro se puede hacer. Los siguientes son los análisis llevados a cabo para los factores naturales involucrados.

La variabilidad climática es la que controla la intensidad y frecuencia de los eventos extremos, tales como fuertes lluvias, desbordamientos, condiciones de sequía, etc., los cuales causan grandes impactos sociales y económicos en el país (IDEAM-UNAL, 2018). Su variación interanual es causada por el fenómeno ENSO. Durante él, existe una disminución de las precipitaciones en las regiones caribe, andes meridionales y nor-pacíficas, mientras que en las regiones de la Orinoquía y piedemonte amazónico sucede lo contrario. Debido a la naturaleza del negocio, el mayor aporte para la hidroelectricidad es el agua y, durante eventos ENSO, es cuando las condiciones más críticas suceden. En la **Figura 6** se pueden ver los más recientes estudios disponibles para efectos climáticos debido a dicho tipo de eventos. A lo largo de la región andina, donde las centrales hidroeléctricas se ubican, se espera un déficit en la precipitación de entre 40 a 80%, evidenciando la susceptibilidad de la infraestructura a tener racionamientos de agua.



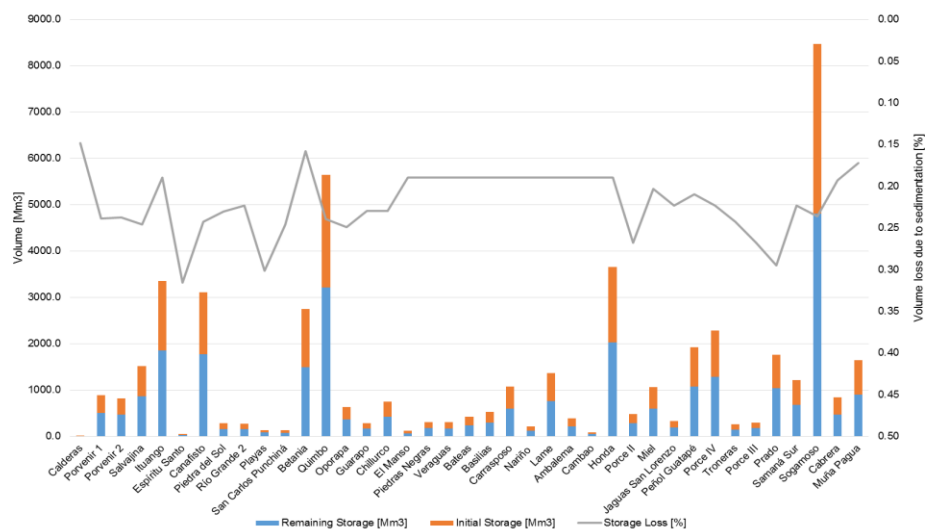
**Figura 6.-** Distribución de anomalías debido a un evento ENSO débil (izq.), moderado (cent.) y fuerte (der.) (Montealegre, 2014)

Por otro lado, la versión más reciente del Atlas climático de Colombia (IDEAM, 2018) concluye que para la precipitación, se espera una disminución de entre 5 a 10% en el caribe y regiones centro y norte de los Andes, donde se superponen con algunas instalaciones hidroeléctricas para el periodo 2011-2070. Para las regiones pacíficas y sur de los Andes, se espera al contrario un incremento de entre 5 a 15% para el mismo periodo. Adicionalmente, luego de un análisis de días cálidos, éstos tienden a incrementarse en todo el país, creando un contexto más seco para la operación de las centrales. Las proyecciones de cambio climático fueron obtenidas mediante escenarios RCP (2.6, 4.5, 6.0, y 8.5), disponible para el proyecto CMIP5 y para la precipitación, un ensamble REA se llevó a cabo para los cuatro escenarios. En la Figura 7 se pueden observar las tendencias de precipitación para los años 2011-2040 y 2040-2070.



**Figura 7.-** Cambios en la precipitación (%) para los periodos 2011-2040 (izq.) y 2040-2070 (der.) (IDEAM, 2018)

Por su parte, **GOTTA (2016)** realizó una caracterización geomorfológica de las corrientes, así como también calculó el balance de sedimentos total sobre la cuenca del río Magdalena. Para la retención de sedimentos (Rx) se comparó la conocida metodología de la curva empírica de Brune (1953) con casi 44 diferentes registros usados para el estudio; igualmente con la metodología de Morris (1963) que propone una correlación entre eficiencia de retención (TE) sobre el radio entre el almacenamiento y el caudal de entrada (C/I) y finalmente con la de Heineman (1981) que modificó la expresión de Morris basándose en si el área del embalse es mayor o menor a 38.85 Km<sup>2</sup> y por consiguiente, la curva de Brune tiene menores o mayores eficiencias de retención respectivamente. La **Figura 8** representa el valor de Rx para el periodo 1970-2013.



**Figura 8.-** Retención de sedimentos de cada embalse para el periodo 1970-2013 (Gómez-Dueñas et al, 2017)



## Análisis LOC

Ya que CRIDA es un enfoque basado en riesgo, el primer paso es, de manera cualitativa, poner juntos los elementos que involucran el concepto de riesgo desde una perspectiva ascendente. Así, los impactos, plausibilidad e incertidumbre se evalúan en este paso. La valoración de impactos depende de sobrepasar los umbrales mencionados en la evaluación del rendimiento. La plausibilidad depende de cuán posible es que los rangos de las variables se basen en la información sostenible (o la metodología usada para obtener rangos de estrés del sistema). La incertidumbre se basa en la calidad de los datos usados para las respectivas evaluaciones. La Tabla 1 entrega un panorama del análisis LOC para cada variable analizada.

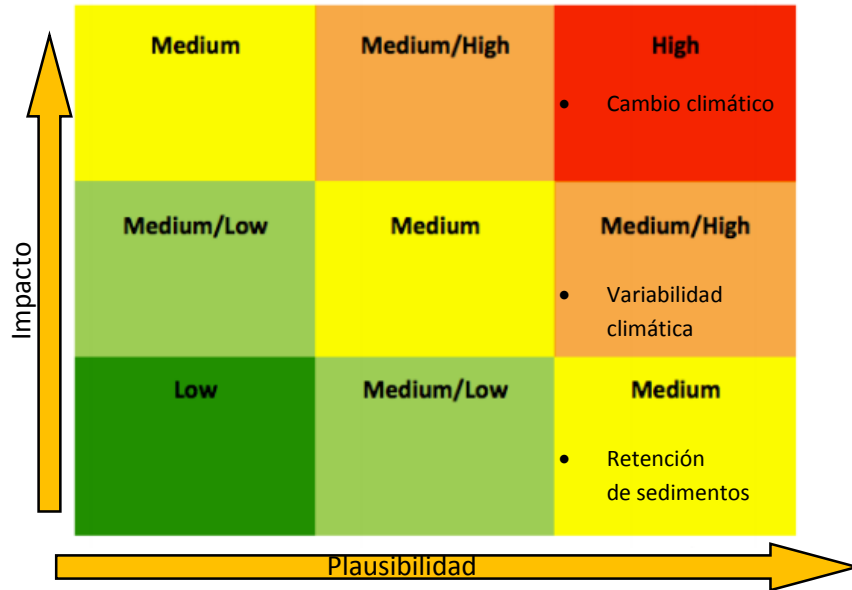
**Tabla 1.-** Level of concern matrix

VARIABLE	IMPACTO	PLAUSIBILIDAD	INCERTIDUMBRE
Retención de sedimento	<b>Rendimiento aceptable.</b> Aunque los resultados muestran un 6% menor de generación, en comparación con el escenario de referencia, no están representativo como con los factores climáticos. La generación energética no depende entonces de la sedimentación, sino de las condiciones climáticas y de la red de centrales.	<b>Alta.</b> Las tasas de sedimentación calculadas varían entre un 15 a 30% como pérdida de volumen en el transcurso del periodo de modelación. Eso significa que los valores obtenidos por GOTTA (2016) son mayores a esta hipótesis. Por ende, se requiere que el modelo se corra con mayores valores de pérdida de volumen para estresar el sistema más allá de los reportes.	<b>Baja.</b> Se calibraron las tasas de retención de sedimentos a partir de las batimetrías llevadas a cabo.
Variabilidad climática	<b>Rendimiento mayormente aceptable.</b> El rendimiento no depende de condiciones más húmedas o secas del clima. Sin embargo, para condiciones húmedas, la generación es mayor que para el escenario de referencia.	<b>Alta.</b> El método de <i>bootstrap</i> se llevó a cabo con base en clima ya observado.	<b>Muy baja.</b> Este clima ya ha sido observado.
Cambio climático	<b>Rendimiento inaceptable.</b> Es el principal factor climático entre los diferentes escenarios de precipitaciones, en los cuales el sistema fue incapaz de cumplir la demanda actual ni la futura proyectada.	<b>Alta.</b> Los GCMs muestran una reducción en la precipitación en la cuenca media y baja de entre 5 y 10%, mientras que para la cuenca alta se proyectó un aumento de entre 5 y 15%. Adicionalmente, lo que colabora a su plausibilidad es que al comparar estos escenarios con los percentiles de variabilidad climática, los valores de percentiles medios y bajos equivalen a la razón de energía del escenario de cambio climático siguiente en sus más altos percentiles. Esto significa que no solamente el impacto debe ser leído de manera vertical u horizontal, sino que se debe leer como una conjunción entre escenarios en los que por ejemplo uno húmedo de variabilidad climática para cierta condición de cambio climático equivale a un seco sin influencia del cambio climático y de igual forma tener el mismo rendimiento.	<b>Alta.</b> Los escenarios son posibles. Si bien son obtenidos a partir de GCMs, es difícil determinar si las anomalías climáticas son debido a variabilidad climática o cambio climático.

Basados en el resumen presentado en la anterior tabla, el paso siguiente es el de ubicar

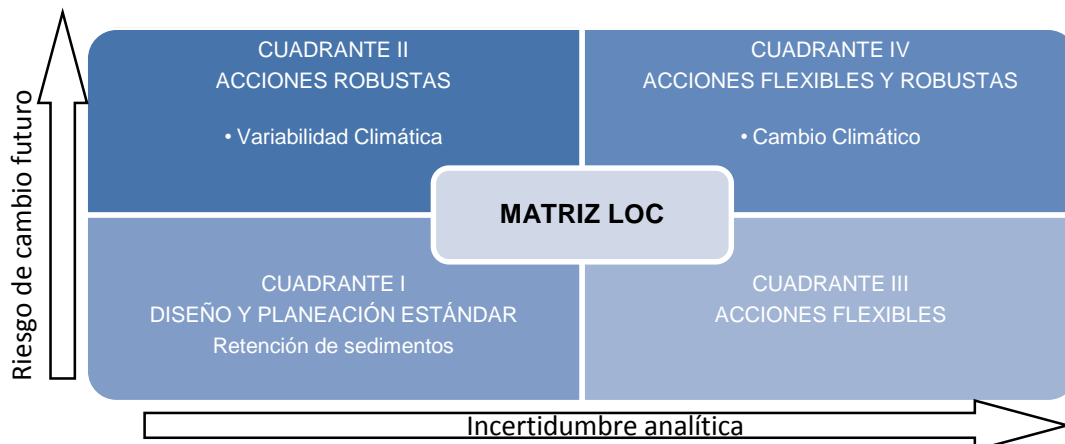
Mayor Información

gráficamente cada uno de los factores en la matriz LOC, presentada en la **Figura 9**. En la medida que la plausibilidad es alta para los tres factores, todas las variables se presentan en la derecha de la figura. Sin embargo, los impactos varían significativamente entre los factores analizados, tal y como se presentó en los resultados de los test de estrés. Como resultado, el cambio climático posee un alto riesgo en el futuro, la variabilidad climática uno medio/alto y la retención de sedimentos, uno medio.



**Figura 9.-** Matriz LOC (Gómez-Dueñas et. al, 2018)

La última etapa del análisis LOC es la matriz de decisiones. Ésta complementa la evaluación del riesgo adicionando elementos de incertidumbre analítica. El cuadrante seleccionado para cada uno de los factores en estudio proveerá recomendación para futuras etapas de planeación. La **Figura 10** muestra los resultados obtenidos para los cuadrantes de decisión para cada uno de los factores analizados



**Figura 10.-** Matriz LOC (Gómez-Dueñas et. al, 2018)

Los resultados muestran un comportamiento dispersión para los factores naturales, tenidos en cuenta para esta investigación. Para los factores climáticos, se requiere seguir una toma de decisiones robusta. Esto significa que las inversiones pueden llegar a ser más altas debido al alto riesgo que representan en el rendimiento del sistema. Sin embargo, la retención de sedimentos representa un

Mayor Información



riesgo inferior que los factores climáticos. Existe una evidencia limitada de que en el futuro el riesgo vaya a cambiar sobre los valores modelados. Comparado con factores climáticos, los efectos de este factor en el rendimiento del Sistema son bajas. Adicionalmente, los cambios en el almacenamiento son bien entendidos debido a que los datos obtenidos provienen de batimetrías que vienen desde que los embalses fueron puestos en operación, en la década del 70, así como la medición de sólidos suspendidos sobre el río indica que los rangos dentro de los cuales el balance de sedimentos está es variable. Por ende, la dirección de la estrategia con sedimentos no se requiere desviar del sistema tradicional de planeación y CRIDA no es el enfoque apropiado para hacerlo.

En el caso de la variabilidad climática, los resultados indican que existe en el futuro un riesgo medio/alto. No obstante, los datos para esta evaluación fueron observados, resultando en una baja incertidumbre. Por consiguiente, la dirección de la estrategia con este factor se emplaza en el cuadrante II, recomendando soluciones ligeramente robustas que en caso contrario podrían ser diseñadas. Sin embargo, ya que los planes tradicionales usualmente están para datos climáticos inciertos, el tomador de decisiones podría considerar una planeación estándar en la que ambos futuros, cierto e incierto, estén involucrados al mismo tiempo y de esta forma, los riesgos del sistema sean manejados.

Si bien los cuadrantes sobre la matriz de decisión difieren significativamente entre sí, el factor de cambio climático presenta una alta incertidumbre e impacto sobre el sistema. Por esta razón, una combinación de acciones robustas y flexibles sería la recomendable. Acciones flexibles permiten el cambio de decisiones entre una y otra en cualquier etapa del horizonte de planeación y aun así, mantiene y es capaz de lograr el objetivo. Acciones robustas significa que la decisión tomada fue a partir de ver condiciones presentes y futuras del clima para determinar si existían opciones por las cuales lamentarse. Consecuentemente, la dirección de la estrategia para el cambio climático debería estar dado para distintos escenarios y posibles vínculos entre ellos, permitiendo la flexibilidad de seguir una cierta decisión hasta que exista la suficiente evidencia para ya sea, confirmar si es adecuada o cambiarla por una más aceptable.

## CONCLUSIONES

Se puso en práctica un nuevo enfoque para la planeación de proyectos mediante la implementación de umbrales para mejorar la generación hidroeléctrica en el área de estudio. El método incorpora incertidumbres inherentes a la toma de decisiones por cuenta de factores naturales. Los enfoques tradicionales de planeación incorporan el método “predecir actuar” que busca que el analista evalúe el rendimiento del sistema de acuerdo a los datos observados, o en ocasiones futuras proyecciones o políticas en ejecución. Sin embargo, se limita la decisión a la información disponible que es bien sabido, contiene incertidumbres. Como resultado, los tomadores de decisiones arriesgan el sistema sobreestimando o subestimando condiciones presentes y futuras.

Luego de haber aplicado el método CRIDA para esta evaluación de vulnerabilidad, existen algunos comentarios. Es importante resaltar el rol del analista al momento de aplicar estos conceptos, debido a que será el que esté evaluando múltiples variables en el proyecto. Debido a que la idea no es obviar información climática disponible, se requiere de manera preliminar un análisis de su relevancia con base en su experiencia sobre ella y el sistema y así, se garantizará que las particularidades del proyecto estén cubiertas. Una vez el problema es entendido, de manera opuesta al marco tradicional, se requiere que el analista formule y evalúe planes alternativos, en vez de formular directamente acciones flexibles o robustas y ahí sí evaluar alternativas. En conclusión, dependiendo de cuán involucrado esté el analista, así como de su entendimiento del problema cómo espera lidiar con las preocupaciones al tomar decisiones será el éxito de la metodología. Sin embargo, CRIDA da las herramientas para que se enfoque mejor en el proyecto.

Mayor Información



Debido a que CRIDA es un enfoque novedoso, existen muy pocas aplicaciones reales en el mundo. Este estudio provee profundidad a los análisis LOC del actual manual de CRIDA. Adicionalmente, la aplicación a la cuenca del río Magdalena amplía el método mediante la incorporación de variabilidad climática y cambio climático a la generación hidroeléctrica, así como la retención de sedimentos en embalses. Próximas evaluaciones van a involucrar análisis con registros de temperatura precipitaciones disponibles (43 años) en una base interanual, que es cuando el sistema tiende a estresarse más y definir así mismo para qué factor natural es más vulnerable el sistema, combinando variables. En conclusión, se requiere continuar esta investigación para una gestión del recurso hídrico más completa que aporte a la toma de decisiones y así, se mejore el rendimiento de la infraestructura, especialmente dada la alarmante expansión proyectada.

## REFERENCIAS

ACOLGEN. (2012). El impacto del clima en las políticas energéticas y de desarrollo: lecciones aprendidas. III Congreso Nacional del Clima. Conference Proceedings. Bogotá: IDEAM.

Brown, C. (2011). A Decision-Analytical approach to managing climate risks: Application to the Upper Great Lakes. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA). Vol 47. Issue 3. Pp 524-534.  
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00552.x>

Brown, C., and R.L. Wilby, 2012. An Alternate Approach to Assessing Climate Risks, Eos Transactions American Geophysical Union. Vol. 93, Issue 41. Pp. 401-402. <https://doi.org/10.1029/2012EO410001>

Craven, J. (2015). SimBasin. Serious gaming for integrated decision-making in the Magdalena-Cauca basin. Dresden.

Foro Nacional Internacional. (2012). Energía hidroeléctrica: Tendencias en la producción e implicancias para el futuro. Agenda: Suramérica. Volumen 10.

Gilroy, K and A. Jeuken (2018). “Collaborative Risk Informed Decision Making: A Water Security Case Study in the Philippines”. Journal of Climate Services (in preparation).

Gómez-Dueñas, S.; Gilroy, K; Gersonius, B.; McClain, M. (2017). “Developing climate-resilient strategies for hydropower generations using a risk-based approach. The case of the Magdalena River Basin in Colombia”. WSE-HWR.17.02. IHE Delft Institute

Gómez-Dueñas, S.; Gilroy, K; Gersonius, B.; McClain, M (2018). “Decision-making under climate uncertainty: An analysis at the hydropower sector in the Magdalena River Basin, Colombia”. Revista AQUA-LAC. Vol. 10. No. 2

Gómez-Dueñas, S.; Gilroy, K; Gersonius, B.; McClain, M (to be published in 2019). “A Bottom-up Vulnerability Assessment of the Hydropower Generation in the Magdalena River Basin in Colombia”.

GOTTA. (2016). Estudio y desarrollo de herramientas para modelación de sedimentos y dinámicas de inundación como complemento a la modelación hidrológica en WEAP, Apoyo en talleres de impactos acumulados por desarrollo hidroeléctrico y propuesta de Hoja de ruta para complementar los estudios. Medellín.

Mayor Información



Sociedad Colombiana  
de Ingenieros



Sociedad Tolimense  
de Ingenieros

**XXIII Seminario  
Nacional  
DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA**

Haasnoot, M., Kwakkel, J.H., Walker, W.E., and Maat, J.T. 2013 Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*. Vol. 23, Issue 2. Pp 485-498. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006>

IDEAM - UNAL, 2018. “Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia”, Bogotá.

IDEAM, 2018. “Atlas Climatológico de Colombia”, Bogotá.

Mariño, J. (2007). Civil Engineering and the Deterioration of the Environment in Colombia. *Revista de Ingeniería*. Universidad de los Andes. No. 26. Pp. 66-73. <http://dx.doi.org/10.16924%2Fria.v0i26.297>

Mendoza, G., A. Jeuken, J. Matthews, E. Stakhiv J. Kucharski, K. Gilroy (2018). Water resources planning and design under uncertainty: Collaborative Risk informed Decision Analysis. In preparation ICWaRM, 2018.

Middelkoop, H et al. (2004). Perspectives on flood management in the Rhine and Meuse rivers. *River research and Applications*. Vol 20, Issue 3. Pp 327-342. <https://doi.org/10.1002/rra.782>

Montealegre J.E., (2014) “Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. Informe de contrato de prestación de servicios profesionales No IDEAM 078 -2014”. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá D.C.

Restrepo, J. (2000). Magdalena River: Interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*. Vol. 235. Issues 1 -2. Pp. 137-149. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00269-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00269-9)

Restrepo, J., & Syvitski, J. (2006). Assessing the effect of Natural controls and land use change on sediment yield in a major Andean river: the Magdalena drainage basin, Colombia. *Royal Swedish Academy of Sciences Ambio*. Vol. 35, No. 2. Pp. 65-74. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2006\)35\[65:ATEONC\]2.0.CO:2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2006)35[65:ATEONC]2.0.CO:2)

TNC. (2016, September 27). Sistema de apoyo a la toma de decisiones de la macrocuenca Magdalena - Cauca. Opgehaald van The Nature Conservancy: [www.mundotnc.org/nuestro-trabajo/donde-trabajamos/america/colombia/sima.xml](http://www.mundotnc.org/nuestro-trabajo/donde-trabajamos/america/colombia/sima.xml)

UNESCO, 2016. “Toma de decisiones y cambio climático: Acercando la ciencia y la política en América Latina y el Caribe”

UPME. (2016). Proyección de la demanda de Energía eléctrica y potencia máxima en Colombia. Versión 2.0. Bogotá.

USACE; Deltares. (2016). “Water Resources Planning and design for future uncertainties. Collaborative Risk Informed Decision Analysis (CRIDA)”. Draft as of October 14. ICIWaRM.

Mayor Información

Comisión Técnica Permanente  
de Ingeniería de Recursos Hídricos

57 (1) 5550520 @ [logistica@sci.org.co](mailto:logistica@sci.org.co)