



REINGENIERÍA GEOLÓGICA, HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DEL CAMBIO CLIMÁTICO: SITUACIÓN Y PERSPECTIVAS

GEOLOGIC, HYDOLOGIC AND HYDRAULIC RE-ENGINEERING OF THE CLIMATE CHANGE: SITUATION AND PERSPECTIVES

©L.F. MOLERIO-LEÓN

INVERSIONES GAMMA, S.A. Apartado 6246, CP 10600, Habana 6, La Habana, Cuba. E-mail: especialistaprincipal@gmail.com

Palabras clave: Resumen

Paleoinundaciones crecidas Los efectos del Cambio climático sobre el régimen hídrico requieren de un enfoque ingeniero diferente adaptado a ellos. Afecta tanto la disponibilidad de agua (demasiada o muy poca) como a los patrones hidrológicos en su sentido más amplio lo que implica la necesidad de reevaluar el diseño y operación de las obras de regulación y captación de las aguas superficiales y subterráneas, así como el de las obras nuevas. Por la semejanza en intensidad y distribución espacial de los patrones de lluvia y escorrentía del Cambio climático con los que ocurrieron en épocas geológicas pasadas, la información sobre paleo crecidas debe incorporarse a estos estudios de reingeniería. En zonas de baja intensidad sísmica, en particular, y por los casos en que la sismicidad activa se ha combinado con eventos hidrológicos de gran magnitud, también es importante incorporar estudios de paleosismología y sismicidad histórica cuyos alcances y contenidos se resumen en este artículo.

Key words: Abstract

Paleofloods The effects of Climate Change on the water regime requires an engineering approach different than traditional. Climate Change affects both water availability (too much or very scarce) and the hydrologic patterns in the broadest sense. It implies that the design and operation of the present and projected water works of surface and groundwater should be reevaluated. Due to the similarity in intensity and areal extension of the rainfall and runoff patterns with those of past geologic times the information of paleofloods should be incorporated. In territories of low seismic activity, information of paleoseisms and historic seismology should also be incorporated accounting for those cases where these two events are combined. The scope of these reengineering studies is described in this paper.

Introducción

El Cambio Climático, consecuencia directa de los procesos que han producido el Calentamiento Global se manifiesta de manera particular en la disponibilidad del recurso agua (Bates, 2008). Los variables efectos sobre el régimen y distribución de las precipitaciones: inversión del régimen de lluvias, desplazamiento de las estaciones, reducción de la lámina de lluvia y de los días con lluvia, mayores intensidades de las lluvias torrenciales y de tormenta, mayor frecuencia de huracanes más intensos, comprometen de manera diferenciada regionalmente, la disponibilidad actual y futura del recurso, pero también, y menos tratado en la literatura, la estabilidad, seguridad, costos de investigación, proyección, operación y mantenimiento de las obras hidráulicas destinadas a su regulación artificial y aprovechamiento. El Trópico Húmedo es un escenario particularmente demostrativo de estos problemas donde la variación de la distribución, intensidad y

frecuencia de la lluvia están modificando el escurrimiento superficial y el subterráneo (menos mencionado) a niveles no previstos y particularmente calamitosos para la sociedad.

Abundan y se multiplican las noticias sobre inundaciones catastróficas, crecidas imprevistas de ríos en magnitudes no calculadas, deslaves y movimientos de ladera asociados a lluvias torrenciales, sequías recurrentes, fallo de presas, puentes y viaductos, hundimientos y subsidencia de terreno, huracanes devastadores que ponen en evidencia que algo está fallando en la concepción y la metodología de la prevención de estos desastres y que muchos proyectos de obras hidráulicas actualmente en construcción no han tomado en cuenta muy en serio las implicaciones del Cambio Climático sobre la hidrología y la geología de las cuencas que regulan. Aumenta la magnitud del peligro y, con ello, zonas antes no vulnerables, ahora lo son y, por tanto, el riesgo aumenta. Incontables pérdidas de vidas humanas, de recursos y bienes se pierden de manera creciente año tras año (Figs. 1 y 2).

Recibido: 20 de noviembre de 2021

Aceptado: 15 de junio de 2022

Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution License CCBY-NC (4.0) internacional.



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Figura 1. Corrección de taludes en Puerto López, Ecuador (Foto del Autor).

Figure 1. Slope correction in Puerto Lopez, Ecuador

Reingeniería de las obras de regulación artificial del escurrimiento superficial

Las presas son obras únicas, prototipos ingenieros en el sentido más amplio. Proyectadas, construidas y operadas bajo condiciones casi únicas, irrepetibles, en un marco fijo, considerado invariante e inamovible en el tiempo y en el espacio, considerado *a priori* y determinísticamente así para todo el tiempo de vida útil para el que fueron concebidas. La mayor parte del parque de presas y embalses artificiales del mundo tienen más de 30 años de construidos, muchísimas con más de 50 años y, en ese tiempo, pues el modelo conceptual fijista ha cambiado y mucho.

El calentamiento global y el consecuente cambio climático, urbanizaciones tanto aguas arriba como aguas abajo, tala de bosques, cambios profundos en el uso de la tierra y el agua, intensos procesos de erosión asociados, variación y, a veces, inversión del régimen de lluvia y de los elementos formadores del escurrimiento fluvial, incremento



Figura 2. Serie de deslizamientos de tierra muy próximos a un desarrollo inmobiliario en las proximidades de la Quebrada Emporio, Panamá. Nótese el reescalamiento sucesivo de los deslizamientos.

Figure 2. Series of landslides near a real estate development in the Quebrada Emporio, Panama. Notice the risk of the continuous movement of the landslides

del uso de pesticidas y abonos orgánicos, azolvamiento superior al pronosticado, cierre o enterramiento de antiguos cauces de avenidas y todos los procesos asociados con el cambio climático, lluvias más intensas o sequías prolongadas, crecidas inesperadas y de magnitudes no previstas e inundaciones apocalípticas han caracterizado todo ese período de explotación de las obras. Los modelos bajo los cuales se diseñaron ya no son válidos en muchos casos o están a punto de dejar de ser útiles.

Es por ello que, como consecuencia de todo lo anterior, se requiere de una nueva ingeniería de todas estas obras que, en suma, pueden agruparse en una reevaluación de sus parámetros de diseño, construcción y operación, bajo las condiciones culturales, sociales, económicas e ingenieras que están asociadas el Cambio Climático. Este artículo resume la aproximación del autor a este tema, expuesto en diferentes foros¹.

¹Concepción, Eloy (1995): Preocupante proceso de inversión del régimen de lluvia en Cuba. Entrevista a Eduardo Planos y Leslie Molerio. Periódico Trabajadores, mayo 29, 1995:4 Molerio-León, L.F. (2008) El cambio climático en el Trópico Húmedo: medidas de adaptación y mitigación en obras civiles e hidrotécnicas. (Seminario, Universidad Católica de Santa María La Antigua, Sede David, Panamá) Molerio-León, L.F. (2010): Ingeniería de proyectos y operación de centrales hidroeléctricas sustentables en el Trópico Húmedo (Conferencia, Miniforo CYTED-IBEROEKA, Cafayate, Salta, Argentina) Molerio-León, L.F. (2011): Una visión empresarial en la Ingeniería de proyectos y operación de centrales hidroeléctricas sustentables en el Trópico Húmedo. El papel de la integración multisectorial (Conferencia, Segundo Taller de la Red Iberoamericana de Energía (REDIENE) Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), Ciudad de Guatemala, Guatemala) Molerio-León, L.F. (2013): Rendimiento Seguro Y Gestión Sostenible De Las Aguas Subterráneas: Prospección, Administración, Uso, Reuso y Monitoreo. (Universidad de Panamá, XVI Congreso Científico Nacional, Mesa Redonda: Gestión y Conservación del recurso agua) Molerio-León, L.F. (2014): Desafíos Ambientales de la Industria Cubana en el Siglo XXI: Una visión desde la externalidad. (CubaIndustria 2014: Primera Convención y Exposición Internacional de la Industria Cubana) Molerio-León, L.F. (2016): Curso breve sobre gerencia general de recursos hidráulicos y efectos de cambio climático sobre la gestión de recursos hidráulicos, para la Empresa Pública del Agua (EPA) del Ecuador (INVERSIONES GAMMA-Empresa Pública del Agua- Secretaría Nacional del Agua - Ecuador) Molerio-León, L.F. (2018): Introducción a la Seguridad de las Presas: Seguridad geológica, hidrológica, estructural y medidas estructurales y no estructurales (Curso de posgrado Universidad de Panamá, Panamá) Molerio-León, L.F. (2021): Reingeniería geológica e hidráulica del Cambio Climático. Conversatorio con el Prof. Luis Enrique Ramos Guadalupe. Programa Cuba 460, martes 3 de agosto de 2021, Habana Radio.

Reingeniería de los sistemas de captación de aguas subterráneas

La reingeniería de las obras de captación de las aguas subterráneas requiere, ante todo, una redefinición del balance hídrico. La disminución de la recarga natural y la pérdida de anualidad de la recuperación de las reservas reguladoras por reducción de la lluvia básicamente, el aumento del nivel del mar y la penetración de la intrusión marina tierra adentro, el incremento sostenido de la explotación del recurso, muchas veces hasta la sobreexplotación, la limitada incorporación de conceptos y técnicas más recientes que permiten evaluar, con mucha precisión, los tiempos de residencia de las aguas subterráneas, la preferencia de captaciones mediante pozos verticales que se profundizan sistemáticamente para combatir el agotamiento de sequías cada vez más recurrentes, unidos al deterioro de la calidad de las aguas subterráneas son temas de necesaria aproximación para mitigar los efectos negativos del cambio climático.

El deterioro de las redes de monitoreo del régimen y la calidad de las aguas subterráneas, la reducida optimización de su estructura, distribución espacial, contenido y frecuencia del monitoreo conspiran de manera nefasta para la creación/actualización de las bases de datos, el procesamiento y la diseminación de información útil para el pronóstico del aprovechamiento de los recursos hidráulicos subterráneas.

En las regiones cársicas (Fig. 3) este problema se amplifica de manera notable: manantiales que se han secado o han disminuido notablemente sus caudales, depresiones notables en los niveles estáticos, pérdida de presión en acuíferos de flujo retardado (confinados, semiconfinados, semilibres), bombeo al nivel de minado de las aguas subterráneas, donde las aguas extraídas están fuera del ciclo de vida de una generación o incluso aguas de largo tiempo de residencia y escasa renovación, hasta fósiles, concentración de obras de toma, regímenes de extracción extendidos e intensos, pérdida de calidad de las aguas subterráneas por falta de tratamiento o como consecuencia de minado de los recursos.

Ejemplos hay de sistemas de derivadoras alimentados por aguas subterráneas que han perdido su anualidad y comprometen fuertemente el ciclo hidrológico de la región, incremento sostenido de la huella hídrica y extensión de la huella hidráulica; es decir, incorporación sistemática de nuevas áreas y acuíferos para satisfacer la demanda creciente de la población, complicada por sistemas de explotación, almacenamiento y distribución obsoletos o mal operados (Fig. 4).

Escenario actual y prospectivo

Estos efectos del Calentamiento Global modificadores de la escorrentía superficial (y también de la subterránea) se están produciendo en un escenario de:

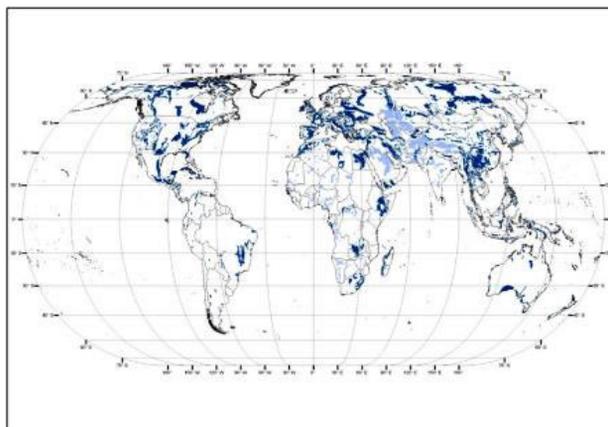


Figura 3. Mapa de las regiones y acuíferos cársicos del mundo (School of Environment; www.fos.auckland.ac.nz).

Figure 3. Karst regions and karst aquifers of the world (School of Environment; www.fos.auckland.ac.nz).



Figura 4. Taza de Vento, sistema de captación de los manantiales del acuífero libre cársico de la Cuenca de Vento donde, en algunos sectores se explotan aguas de tiempos de residencia del orden de los 100 años. Obsérvese la depresión de los niveles de descarga por el cambio de coloración de la estructura (Foto del Autor).

Figure 4. Taza de Vento, collection water work of the Vento's karst springs. Some of the exploited groundwaters show residence times greater than 100 years. Notice the depression of the ground water level in the change of color of the structure

- Un balance hídrico desactualizado, básicamente debido - en el caso de las aguas superficiales, a la discontinuidad de las series de observaciones hidrológicas e hidrometeorológicas, el azolvamiento de los embalses (Laiz y Flores, 2010 han reportado entre el 18,5 y 37,8% de pérdida de capacidad en algunos embalses cubanos y nosotros hemos encontrado pérdidas entre el 20 y 30% en embalses de Ecuador y Panamá, (Costa, Molerio y Upadhyay, 2014; Molerio, 2013), la reducción de las

áreas de alimentación y, -en las subterráneas, también la escasa y deficientemente procesada data hidrogeológica, las captaciones no autorizadas, una creciente pérdida de calidad de los recursos subterráneos debido a su contaminación, escasas acciones de creación de datos nuevos cuantitativos (en el que se incluye el mejoramiento del diseño y operación de las redes de monitoreo), ausencia de políticas de reposición de las reservas y el aumento de las presiones sobre el recurso asociadas a urbanizaciones irregulares, migraciones y la intrusión marina creciente en estados insulares y acuíferos costeros continentales (IPCC, 2019)

- Envejecimiento del parque de presas (almacenadoras, derivadoras, hidroeléctricas, de relaves), puentes, viaductos y obras hidráulicas en general, con el incremento del riesgo de fallos estructurales de estas obras
- Modificaciones del uso de la tierra y el agua en las cuencas reguladas (tanto aguas arriba como aguas abajo) con posterioridad a la construcción de las obras reguladoras; entre ellas, la tala de bosques, incendios forestales, urbanización con las consabidas consecuencias en:
 - Aumento de la erosión y de los sólidos transportados por la escorrentía directa y difusa, entarquinamiento de cauces fluviales, embalses y canales
 - Eutrofización de embalses y emisión de gases de efecto invernadero
- Reducción de las capacidades de generación de energía hidroeléctrica por déficit de lluvia y, por ende, de escurrimiento
- Urbanización (o suburbanización) creciente, pocas veces planificada, y crecimiento u ocupación desordenada en los cauces de ríos estacionales, planos de inundación y vertientes inestables aguas abajo y en las áreas de embalse, o abandono de las tierras, incremento de los coeficientes de escurrimiento pro pavimentación y, el peligro siempre latente, de canalización y enterramiento de antiguos ríos, tanto contemporáneos como paleoríos
- Reducción de acciones gubernamentales de hidrología operativa, particularmente de servicios de monitoreo y prevención hidrológica
- Desactualización de las curvas de despacho de los operadores de embalses, en muchos de los cuales se trabaja con los gráficos de diseño sin considerar el azolvamiento de los embalses ni el desarrollo de la vegetación acuática, entre otros
- Modificaciones de los hidrógrafos de avenida, en particular, con una fuerte alteración de los tempos de

concentración, los picos y forma de las crecidas y los tiempos de tránsito; el fenómeno de crecidas instantáneas (flash floods) imprevisibles

La longitud de la data y sus implicaciones

Definir la variación climática a partir de la data de las series temporales de observaciones instrumentales es una tarea de alcance limitado debido, precisamente, a la distinta concepción en el diseño de las redes, sobre todo, de los objetivos, diferencia entre la longitud de las series en el mismo país y entre países de la misma región climática, la baja cobertura de las redes de monitoreo, el tipo de mediciones, la instrumentación, la calidad de operación de la red, el bajo desarrollo de las capacidades nacionales tanto en instrumental como en personal, problemas con el almacenamiento y la recuperación de los datos y los métodos de generalización. Para obtener respuestas globales se recurre a la modelación matemática, muy robusta pero que adolece del problema de la escala. Ya que se hace a nivel planetario y luego, mediante el proceso denominado “downscaling” es necesario bajarla a escalas más precisas, lo que no siempre es posible o permite resultados fidedignos, confiables desde el punto de vista ingeniero.

Un recurso que ha cobrado actualidad, sobre todo a partir de las recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica para asegurar la estabilidad de obras de gran envergadura, es la incorporación de paleoregistros; es decir, la recopilación de evidencias geológicas e hidrológicas que permitan extender el catálogo de eventos físicos relevantes, como las crecidas o los sismos a periodos muy anteriores a los registros instrumentales. En el caso de las instalaciones nucleares, por ejemplo, la OIEA ha recomendado que, para zonas de sismicidad baja a media, se llegue hasta 10 000 años atrás. Respecto al registro de paleocrecidas y paleoinundaciones no existe un acuerdo al respecto, pero urge alcanzarlo, al menos, a escala de país o de regiones específicas. Ejemplo de la necesidad, en Cuba sería, por ejemplo, el caso del Huracán Frederick en 1979, cuyas inundaciones alcanzaron -de manera imprevisible- las zonas de los antiguos lagos Pleistocénicos de los poljes Ariguanabo y Vento, en Cuba Occidental.

Teniendo en cuenta que la data confiable comienza a principios del siglo XX existen muchas limitaciones para separar la variación, el cambio climático, de la variabilidad local o aun regional. La Organización Meteorológica Mundial se ha ocupado del tema desde sus inicios, pero existe una diferente concepción del “cambio” climático entre el Programa Internacional de Cambio Climático (IPCC) y la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Nosotros seguimos aquí la definición del IPCC (2013) mediante la cual se trata de “*un cambio en el estado del clima identificable en alguna de sus propiedades...y que persiste durante un periodo*

prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos...". Para la definición del clima se requiere de no menos de 30 años de datos de las propiedades de superficie que lo caracterizan (temperatura, precipitación o viento).

Identificación e incorporación de las evidencias paleohidrológicas y de hidrología histórica

El estudio de las paleoinundaciones (Kochel y Baker, 1982) no es nuevo, pero es de reciente factura. House et al. (2002) han señalado que el objetivo primario de la hidrología de las paleoinundaciones (paleocrecidas) es extender la cronología de estos eventos a períodos también más allá de los registros instrumentales e históricos, incluso, que abarquen entre centenares y miles de años. De esta manera, las cronologías derivadas pueden constituir la base de registros proxy para elaborar aquellas cronologías que producen eventos de inundaciones, proveer información acerca de los cambios en la morfología de los sistemas fluviales y servir como estándares para la comparación conceptual de modelos de avenidas y peligros de avenidas en ríos y corrientes específicas. La paleohidrología de estas avenidas e inundaciones antiguas tienen un valor social específico muy importante para la sociedad al constituir la base de estudios de riesgos hidrológicos, peligros naturales fluviales y, en general, de gestión del riesgo. Igual ocurre con los registros históricos. La Habana y Guayaquil, por ejemplo, son dos ciudades que han crecido a expensas del enterramiento de ríos, desecación de marismas, desviación de cauces fluviales o recuerdan zonas sometidas a inundaciones periódicas y que eran activas en tiempos históricos² y hoy se cobran el precio de una hidráulica mal planificada y una vuelta hidrológica a tiempos preactuales donde vuelven las aguas a tomar sus antiguos cauces. Unido al mal diseño, operación y mantenimiento de redes y el aumento del nivel del mar, las inundaciones que hoy sufren ambas ciudades son claro ejemplo de estos errores (Molerio, González y Planos, 2015).

Se toma ventaja de las posibilidades que brindan el karst y las cuevas en la conservación de estas evidencias y el proyecto incorpora la evidencia geoespeleológica de varias maneras; a saber:

- a. La cueva *per se*, como cuenca receptora de sedimentos del entorno (Fig. 5) que constituye su propia cuenca de drenaje superficial y sistema de flujo subterráneo al que está asociada: los llamados indicadores de paleoestado hidrológico (Paleostage Indicators -PSI- de Baker (1987). Aquí se derivan las siguientes evidencias potenciales tanto para el fechado como para la reconstrucción del proceso de crecida (Baker, 1988, 1989, 1994, 1998, 2008):
 - La estratigrafía y, por supuesto, la cronoestratigrafía de los sedimentos sobre todo aluviales y también lacustres que se conservan en el interior de las cuevas; muchos de ellos englobados en los llamados por Kochel, (1980), Kochel y Baker (1988) "Slack Water Deposits (SWD). En este sentido, son particularmente importantes aquellos que se conservan en partes altas de las cuevas que se han conservado sin alteración y bien conservados en tanto no han sido afectadas por otras crecidas en el pasado geológico reciente. Aquí distinguimos; especialmente: 1) aquellas cuevas originadas por corrientes helicoidales asociadas con flujos lacustres en valles cerrados antiguos (algunos de ellos registrados y documentados a decenas de metros sobre el piso actual de los valles; 2) las que están directamente asociadas a cauces fluviales pretéritos (incluso algunos que han dejado de existir y el valle aguas arriba ha sido fosilizado o, al menos, desactivado hidrológicamente y 3) las que reciben escorrentía lateral difusa con arrastre de sedimentos y que, en la actualidad, han cambiado su función hidrológica de conductoras a absorbentes.
 - Los registros dendrocronológicos de la vegetación introducida en las cuevas como consecuencia de las avenidas
 - La fauna fósil -particularmente la de vertebrados- que habitaban el exterior y: a) podían buscar refugio o alimento en el umbral de la cueva, b) la que eventualmente fue arrastrada al interior por las crecidas
- b. Los sedimentos autóctonos; es decir, generados en la propia cavidad, como las espeleotemas y, entre ellas, particularmente las estalagmitas, aunque otro tipo de depósitos no dejan de ser importantes, aunque han sido menos estudiados; como ciertas capas de sínter y aún, la columna deposicional de los gours, cuyos registros isotópicos Kochel, Baker y Patton, 1981) constituyen evidencia de los cambios en el régimen hidroclimático de la cuenca (o paleocuenca).

En zonas de sismicidad baja a media, siguiendo las recomendaciones del OIEA, se han preferido también las evidencias que se conservan en los paisajes cársicos y, particularmente los subterráneos; es decir, las cuevas y cavernas. Las espeleotemas, tanto fracturadas como las que están sanas, pueden tomarse y, de hecho, lo han sido, como evidencias de antiguos sismos y se consideran señales de terremotos de cierta intensidad y magnitud que ocurrieron (o no ocurrieron) en pasadas épocas geológicas.

²Se conservan en La Habana las calles y barriadas, Lagunas, Ciénaga, el Chorro, Molinos del Rey, Desagüe



Figura 5. Terrazas fluviales indicadoras de paleocrecidas en el Salón de los Gigantes, Sistema Cavernario Majaguas-Cantera (Foto del Autor).

Figure 5. Fluvial terraces indicating ancient levels of paleofloods in the Salón de los Gigantes (Giants Room), Sistema Cavernario Majaguas-Cantera (Majaguas-Cantera Cave system)

Trascienden así los registros instrumentales e históricos y eventualmente permiten contribuir a reconstruir la historia de la sismicidad de una región dada. Son sobre todo especialmente importantes cuando no pueden reconocerse las fallas y estructuras sismoactivas.

El modelo teórico en principio es muy simple: las formaciones fracturadas y/o desplazadas son consecuencia de eventos sísmicos pasados, en tanto aquellas que están sanas prueban que sismos de una magnitud determinada no han ocurrido en la región. Entre ambos extremos hay un espectro bastante amplio de posibilidades, ya que el agrietamiento, colapso, desplazamiento, recristalización y resoldamiento de espeleotemas, así como la clastificación, subsidencia de pisos, recrecimiento de espeleotemas y reexcavación de galerías no necesariamente están siempre vinculadas con eventos sísmicos, sino que pueden deberse a otras causas: desde deformación de las estructuras cristalinas de las propias concreciones hasta la fatiga de los materiales pasando, como lamentable práctica, por la ruptura deliberada de visitantes a las cuevas.

Acciones de reingeniería en la hidrología superficial y subterránea

Un grupo de acciones de reingeniería que se requieren para minimizar los riesgos de fallo de estructuras han sido propuestas en diferentes escenarios docentes y de investigación fundamental y aplicada de Argentina, Cuba, Ecuador, Guatemala y Panamá en los últimos años (Molerio, 2018, 2020a, 2020b). Están orientados en dos direcciones, una para las obras en operación (Fig. 6), y otra a las obras en proyecto y construcción, son de tipo geológico, hidrológico y estructural y se pueden resumir a continuación:

- Revisión de los proyectos de obras hidráulicas y de obras en operación, sobre la base de:
 - Actualización de la data hidrológica de diseño, habida cuenta que, en muchos casos, de haberse mantenido las redes de monitoreo, se pudiera disponer de entre 30 y 50 años de datos hidrometeorológicos en los que pudiera identificarse variabilidad o variación del clima en el área de influencia y, con ello, identificar cuáles de los parámetros estructurales de seguridad se mantienen o deberían ser ajustados
 - Comprobar los pronósticos de azolvamiento
 - Actualizar el uso de la tierra y el agua en el área de embalse y en la cuenca aguas abajo
 - Recalcular los parámetros de la avenida por reboso (overflow) o fallo de la obra y la evaluación de las vulnerabilidades aguas abajo (Fig. 7)
 - Reevaluar el estado de las obras hidráulicas en la cuenca vertiente regulada, incluyendo el sector situado aguas abajo del sistema de retención
 - Definición de los escenarios críticos de colapso de obras hidráulicas dados por la convergencia de sismos, lluvias torrenciales, crecidas, movimiento de laderas (deslaves, desprendimientos, hundimientos, subsidencia, empantanamientos), vulcanismo y tsunamis
- Inclusión de los pronósticos de los procesos de formación del escurrimiento en los nuevos proyectos y considerar estos pronósticos en las obras construidas particularmente en la última década y media para:
 - Depuración de la data de lluvia de outliers (particularmente considerando el tipo de lluvia en la serie disponible)
 - Garantizar que indicadores básicos, como las curvas de intensidad-frecuencia-duración, estén actualizadas con la nueva data
 - Incorporación de tecnologías adecuadas para evaluar los peligros de movimiento de laderas en las áreas interesadas (tanto aguas arriba como aguas abajo)
 - Ajustar la red de monitoreo con la distribución, contenido, frecuencia de muestre adecuadas a los problemas identificados
- Actualización de los códigos y normativas de investigación, proyección, construcción, operación, mantenimiento y monitoreo geológico, hidrológico y estructural



Figura 6. Trasvase Dauvín, Ecuador, derivadora para el control de inundaciones (Foto del Autor).

Figure 6. *Dauvin Diversion Dam, Ecuador, for flood control.*

- Incorporar los resultados de las investigaciones paleohidrológicas, particularmente de paleocreidas y de la hidrología histórica comparativa (no instrumental)
- Rediseño de los regímenes de explotación de las aguas subterráneas y de los sistemas de interacción agua superficial-agua subterránea, como un recurso único, particularmente en el karst; entre estas acciones:
 - Reevaluación de los recursos hidráulicos subterráneos sobre la base de una categorización en base a la mineralización y al uso de las aguas; sobre todo en acuíferos costeros y en n las pequeñas islas y estados insulares
 - Rigurosa evaluación de los tiempos de tránsito y los patrones de evaporación e infiltración aplicando técnicas con incertidumbre reducida, como las de hidrología isotópica
 - Valorar con certeza la necesidad y la posibilidad de mejorar los recursos a partir de la reposición artificial de las reservas
 - Redefinir el alcance y validez de las zonas de protección sanitaria de manantiales y sistemas de captación
 - Perfeccionamiento del inventario de la explotación de las aguas subterráneas
- Incidir de manera directa con inversionistas y autoridades de planificación física en lo que respecta a la protección de áreas de recarga natural reduciendo las afectaciones en los volúmenes disponibles de alimentación del acuífero y los efectos secundarios de la variación de los coeficientes de escurrimiento y sus consecuencias sobre la magnitud y frecuencia de avenidas e inundaciones



Figura 7. Fallo por rebose de la cortina y de los aliviaderos de la presa Oroville, California (febrero 14, 2017).

Figure 7. *Failure of the Oroville Dam caused by overflow and failure of the spillways due to unexpected flooding (February 14, 2017)*

Estas acciones son válidas también para la gestión de las aguas subterráneas, razón por la cual se incluyen en la última pleca anterior. Por citar un caso, la elevación sistemática del nivel del mar está afectando los acuíferos costeros promoviendo la penetración tierra adentro de la intrusión marina. Habida cuenta que la intrusión se expresa tanto en la propagación horizontal como en la vertical, se requiere de nuevos modelos de sistemas de extracción (campos de pozos; captaciones horizontales), diseño de regímenes adecuados de explotación y de zonas de protección, obras más eficientes de recarga artificial y renovación de las reservas y recursos, refinamiento de los métodos de cálculo del rendimiento seguro, incluyendo el tiempo de tránsito de las aguas subterráneas que, en fin, garanticen la sostenibilidad en el aprovechamiento del recurso. En el karst, donde es más evidente y directa la relación entre las aguas superficiales y subterráneas, esta es una demanda creciente e imperativa. Para el caso de Cuba es determinante, ya que el 65% de la superficie del país es cársica y más del 85% de los recursos de agua disponible se encuentran en estos terrenos. La combinación de la sequía recurrente en los últimos 20 años, con la consabida disminución de las lluvias y la penetración de la intrusión marina constituyen una situación infortunada en algunos acuíferos importantes, como la cuenca M-IV, en Cárdenas, Matanzas. Para los pequeños estados insulares la situación llega a ser crítica.

Pero también, de inmediato, se requiere de una revisión de la situación de explotación actual con acciones que abarquen la distribución de los sistemas de extracción, régimen de bombeo y reducción de las áreas de recarga natural, entre otros.

Acciones de reingeniería geológica y geomorfológica

Las propiedades ingenieras de las rocas constituyen un marco fijo y no están sujetas a alteraciones como consecuencia del Cambio climático, pero los relieves de los que forman parte sí lo son y, en este sentido, las modificaciones en el uso de la tierra y el agua pueden tener, y tienen, graves consecuencias. Sobre todo, porque, en primer lugar, la disminución de la cobertura boscosas, el cambio de vegetación, la desprotección de las laderas, la ocupación humana de terrenos susceptibles a deslizamientos y desprendimientos, son causa directa de fenómenos de subsidencia, erosión y transporte de sedimentos (con el consecuente aporte al entarquinamiento de corrientes y azolvamiento de embalses).

En esta dirección el aporte de la data hidrológica y su uso en evaluaciones de riesgos son fundamentales para lograr armonizar la situación actual y mejorar la situación de vulnerabilidad de muchas comunidades. Acciones inmediatas son:

- Elaboración de los mapas de susceptibilidad a los deslizamientos (Fig. 8)
- Implementación de sistemas de monitoreo geológico y geofísico incluso, a escala de obras, pero acoplado a estructuras de captación, procesamiento, generalización y diseminación de la información y sistemas de alerta temprana y aviso preventivo. Muchos desastres no han sido evitados por la combinación de eventos aparentemente no relacionados o, cuando relacionados no manejados a escalas mayores que la propia infraestructura. El desastre de la Presa de Vaiont, Italia, en 1963 (Fig. 9), por eventos conjugados, es elocuente. Efectivamente, con el antecedente de que una serie de sismos menores afectaron la presa, terminada en 1960, la estructura estaba destinada a amortiguar la crecida de lluvias intensas en la cuenca, que comenzaron el 28 de septiembre, durante el proceso de llenado, pero un terremoto de baja intensidad (octubre, 9) provocó un deslizamiento de 250 millones de m³ y, en 45 segundos, 50 Hm³ de agua provocaron una ola de 250 m de altura (100 m por encima de la cortina) que arrasó los poblados aguas abajo. Otro caso notable (Fig. 10) fue el del terremoto de Napo, Ecuador, del 5 de septiembre de 1987, en que un sismo de Mb 6,9° se combinó con una tormenta produciendo, ambos, deslizamientos en la Vertiente Amazónica de Los andes, provocando 3000 fallecidos, 5000 desaparecidos, 75000 viviendas destruidas y pérdidas económicas por dos billones de dólares
- La modelación geológica y la simulación matemática de los procesos es fundamental. La semejanza dinámica en modelos naturales que se observa en eventos diferentes

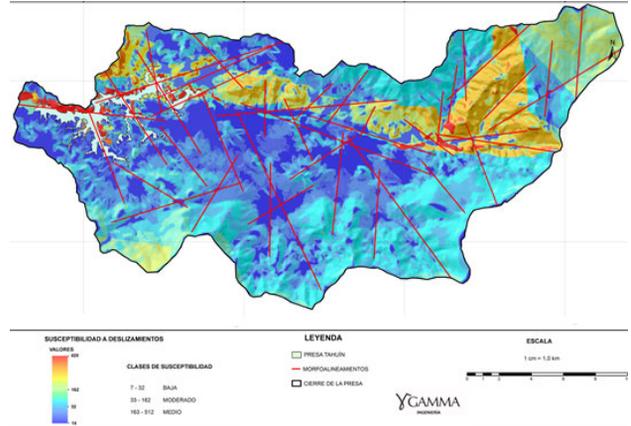


Figura 8. Mapa de susceptibilidad a los deslizamientos para la cuenca vertiente a una presa basado en la Metodología de Mora-Vahrson (1994).

Figure 8. Map of landslides suitability of the basing of a reservoir applying the methodology of Mora & Vahrson (1994)

(Fig. 11) es la base para proceder con la activa colecta y procesamiento de datos en tiempo real (o cuasi real en los casos en que lo permita la categoría del peligro y la información fidedigna que se haya obtenido acerca de las propiedades de inercia (memoria del sistema) y autorregulación, muchas veces asociadas a reactivación de la neotectónica o de estructuras tectónicas antiguas.

- En este sentido, la determinación de las consecuencias de la licuefacción, subsidencia, solifluxión consecuencia de los movimientos ascensionales del manto freático debidos a la sismicidad o a la respuesta a lluvias torrenciales debe ser calibrada adecuadamente mediante modelos de pronóstico. En el fondo de los embalses y en los paquetes de sedimentos acomodados en las estructuras de la presa (cortina, obras de toma, túneles) estos movimientos pueden provocar desplazamiento de los azolves que deben ser investigados mediante monitoreo adecuado (isotópico, batimetría)
- La identificación de indicadores de inestabilidad es sumamente importante, aunque muy compleja y a veces se confunde con la avulsión de los canales que suele ser un proceso normal de la dinámica de los canales fluviales. Por lo común, estos indicadores deben buscarse en los cambios en la sección transversal del cauce. En paralelo, la definición de los facorres estresantes que pueden afectar los procesos fluviales y el desarrollo del relieve dentro y fuera de la cuenca

Nota final

Las crecientes evidencias acumuladas en los últimos años sobre el fallo de obras civiles e hidráulicas debidas a problemas de alteración del entorno geológico,

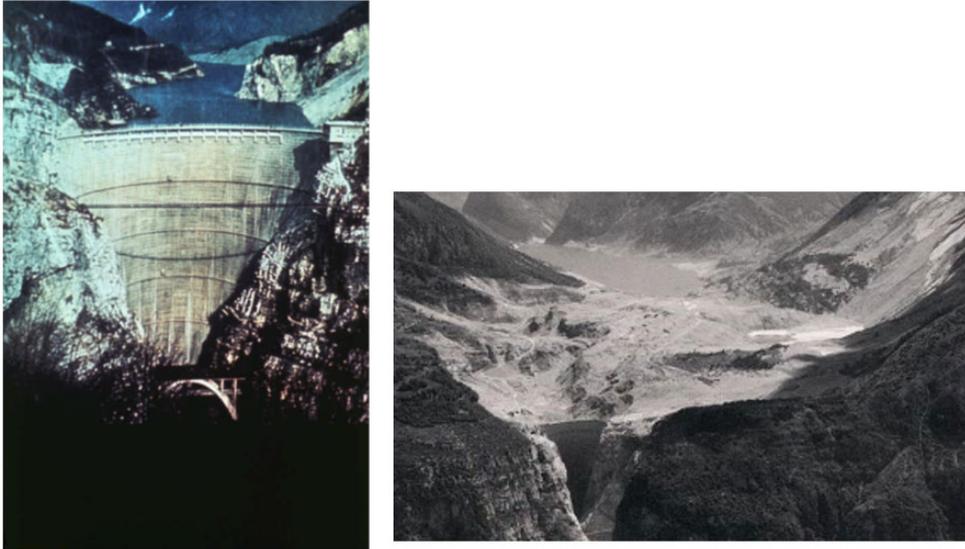


Figura 9. Dos momentos del colapso de la cortina de la presa Vaiont: antes del evento, izquierda y después, derecha (Fotos Archivo del Autor).

Figure 9. Two moments of the failure of the embankment of the Vaiont Dam; left, before; right, after the collapse)



Figura 10. Deslizamientos provocados por la combinación de sismos y lluvias torrenciales Napo, Ecuador (Foto Archivo del Autor).

Figure 10. Landslides due to the combination of earthquake and heavy rainfall in Napo, Ecuador

geomorfológico e hidrológico sea por la combinación de fuerzas endógenas y exógenas o por una u otra de manera independiente, (terremotos, crecidas e inundaciones, movimiento de laderas) no deja lugar a dudas que, con independencia de las modificaciones que el cambio de uso de la tierra (urbanizaciones no planeadas, ocupación de áreas de inundación) haya podido provocar, existe un vacío de información en la data de proyecto para muchas de estas obras. En su mayoría obras envejecidas, fueron proyectadas y construidas con información derivada de bases de datos generalmente muy cortas, en las que efectos de variabilidad o incluso de variación climática no podían aparecer. Hoy, sin embargo, la vulnerabilidad de las obras se ha incrementado por factores no previstos en el comportamiento de las variables hidrometeorológicas, en eventos sísmicos y en deslizamientos y desprendimientos de tierra y rocas o subsidencia que, por conocimiento incompleto no pudieron preverse.

Para la mayor parte de esas obras, que datan de 30 a 50 años de operación, debe tomarse ventaja de poder incorporar 30-50 años de datos de monitoreo, cambios en el uso del agua y la tierra y proceder a una reevaluación de los parámetros de diseño, operación y mantenimiento de tales estructuras. Esta acción ya va siendo imprescindible por la asociación directa entre las consecuencias del Cambio Climático y la calidad de las obras.

Este proceso, que hemos llamado Reingeniería geológica, hidrológica e hidráulica del Cambio Climático ya requiere de una implementación adecuada para tratar de reducir los peligros aguas abajo, sobre todo, de las cuencas reguladas y evaluar la capacidad de resistencia y asimilación de eventos



Figura 11. Semejanza dinámica de modelos naturales y reactivación tectónica. Izquierda, terremoto de Guajrat, India, de enero, 2001 (Mw=7,5); Derecha, Jama, Ecuador, Terremoto de Pedernales de Abril de 2016 (Foto del Autor).

Figure 11. Dynamic similarity of natural models and tectonic reactivation. Left, Guajrat Earthquake, India, January, 2001 (Mw=7,5); right, Jama, Ecuador, Pedernales Earthquake, April, 2016.

extraordinarios tal vez no considerados en los proyectos originales.

En ayuda de la data incompleta o para su complementación, las evidencias derivadas de paleosismos y paleoinundaciones constituyen una herramienta básica para extender los catálogos de sismos y crecidas en las cuencas de interés.

Bibliografía

- Baker, V. R. (1987). Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *Journal of Hydrology*, 96(1-4), 79-99.
- Baker, V.R., (1988): Flood geomorphology and palaeohydrology of bedrock rivers. In: Dardis, G.F., Moon, B.P. (Eds.), *Geomorphological Studies in Southern Africa*. A.A.Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 473-486.
- Baker, V.R., (1989): Magnitude and frequency of palaeofloods. In: Beven, K., Carling, P.(Eds.), *Floods, Their Hydrological, Sedimentological and Geomorphological Implications*. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 171-183.
- Baker, V. R. (1994). Geomorphological understanding of floods. In *Geomorphology and natural hazards* (pp. 139-156). Elsevier.
- Baker, V.R., (1998): Paleohydrology and the hydrological sciences. In: Benito, G., Baker, V.R., Gregory, K.J. (Eds.), *Palaeohydrology and Environmental Change*. Wiley, Chichester, pp. 1-1
- Baker, V. R. (2008). Paleoflood hydrology: Origin, progress, prospects. *Geomorphology*, 101(1-2), 1-13.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, [Eds.] (2008): *El Cambio Climático y el Agua*. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 224:
- Carson, Eric C. (2013): *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology*. P. Kyle House, Robert H. Webb, Victor R. Baker, and Daniel L. Levish (Editors), 2001, American Geophysical Union, Water Science and Application Series, Volume 5, Washington, DC, vi 386 pp. Book reviews. *Geoarchaeology: An International Journal*, Vol. 18, No. 2, 283-286 (2003)
- Costa Posada, Carlos Rufino; Leslie F. Molerio-León, Drona Upadhyay (2014): *Revisión de metodología para la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de los sistemas hidroeléctricos RG-T1840*, Baastel & IADB, Quebec, Canadá, 77:
- House, P. Kyle, Robert H. Webb, Victor R. Baker, Daniel R. Levish (2002): *Ancient floods, modern hazards: principles and applications of paleoflood hydrology*. Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, 380:
- IPCC (2013): *Glosario* [Planton, S. (ed.)]. En: *Cambio Climático 2013. Bases físicas*. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América: 185-204

- IPCC (2019): Resumen para responsables de políticas. En: El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres [P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.)]. En prensa.
- Kochel, R.C., (1980): Interpretation of flood paleohydrology using slackwater deposits, Lower Pecos and Devils Rivers, Southwestern Texas. Ph.D. dissertation, University of Texas, Austin.
- Kochel, R.C., V.R. Baker (1982): Paleoflood hydrology. *Science* 215, 353-361.
- Kochel, R.C., V.R. Baker (1988): Paleoflood analysis using slackwater deposits. In: Baker, V.R., Kochel, R.C., Patton, P.C. (Eds.), *Flood Geomorphology*. Wiley, NY, pp. 357-376.
- Kochel, R.C., V.R. Baker, P.C. Patton (1981): Implications of radiocarbon dated tributary mouth slackwater deposits to paleoflood hydrology. *EOS* 62, 277.
- Molerio León, L.F. (2018): Introducción a la Seguridad de las Presas: Seguridad geológica, hidrológica, estructural y medidas estructurales y no estructurales. Universidad de Panamá, Panamá, 669:
- Molerio León, L.F. (2020a): Incorporación de la evidencia espeleológica de paleosismos y paleohidrología a la seguridad de los sistemas hidráulicos de América Latina y El Caribe. Premios Latinoamérica Verde. 31: <https://www.researchgate.net/publication/341726375>
- Molerio León, L.F. (2020b): Incorporación de la evidencia espeleológica de paleosismos y paleohidrología a la seguridad de los sistemas hidráulicos de América Latina y El Caribe. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo*, 20(38), 2020, 7:
- Molerio León, L.F. (2013): Centrales hidroeléctricas sustentables en el Trópico Húmedo y el papel de la integración multisectorial. *Mapping Latino*, 26 agosto 2013, 26: <http://mappinglatino.com/blog/2013/08/26/centrales-hidroelectricas-sustentables-en-el-trpico-hmedo-y-el-papel-de-la-integracin-multisectorial/>
- Molerio-León, L.F., Ma. I. González González, E.O. Planos Gutiérrez (2015): Singularidades de la gestión de acuíferos insulares en el trópico húmedo: Ciclo urbano del agua en La Habana, República de Cuba. In/ Vammen, K. y A. de la Cruz Molina [Editores] (2015): *Desafíos del Agua Urbana en Las Américas. Perspectivas de las Academias de Ciencias*. <http://www.ianas.org/index.php/books>, UNESCO-IANAS, México: 236-255
- Mora C, Vahrson, W. G. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 31(1), 49-58