

Gestión de recursos hidráulicos bajo riesgo de terremotos en Ecuador: 1. Sismotectónica

Leslie F. Molerio León

Inversiones Gamma, S.A, La Habana, Cuba

Email: especialistaprincipal@gmail.com; leslie@div.gamma.com.cu

RESUMEN

En la primera parte de este trabajo se revisan algunas de las características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, hidráulicas y geofísicas más importantes del Ecuador y particularmente de la vertiente tectónicamente inestable del Pacífico y su relación con la prevención y mitigación de peligros de los efectos dañinos de los terremotos y sus efectos secundarios sobre la infraestructura hidráulica y la preservación de la cantidad y calidad de los recursos hídricos del Ecuador Occidental.

Palabras clave: Ecuador, recursos hidráulicos, rotura de presas, terremotos, tsunamis.

Management of Ecuador water resources under earthquakes risk: 1. Seismotectonics

ABSTRACT

The first part of this study reviews some of the most important geologic, geomorphologic, hydrologic, hydraulic and geophysical characteristics of Ecuador, and particularly of the tectonically unstable Pacific slope and its relation with the hazard prevention and mitigation of the damaging effects of earthquakes and its side-effects on the hydraulic infrastructure and the preservation of water resources (amount and quality) of Western Ecuador.

Keywords: Ecuador, water resources, dam failure, earthquakes, tsunamis.

INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas y los terremotos son peligros geológicos importantes casi imposibles de predecir. Mientras que para las erupciones volcánicas generalmente las medidas y alertas de seguridad pueden adelantarse, existe una altísima incertidumbre sobre el lugar, momento e intensidad en que puede producirse un terremoto. Los efectos destructivos de estos fenómenos son bien conocidos e incluso pueden ser peores cuando erupciones y terremotos aparecen juntos o incluso más, cuando se combinan con efectos secundarios como tsunamis o fuertes lluvias, como ha ocurrido en el pasado reciente en Ecuador. Particularmente, los sistemas de abastecimiento de agua podrían verse gravemente dañados y la situación suele empeorarse porque se reduce o suprime drásticamente la disponibilidad de agua (en cantidad y calidad). Sin embargo, los daños que estos fenómenos producen sobre las obras hidráulicas no son la única causa que podría afectar la provisión normal de agua en las zonas dañadas.

Cuando las presas de almacenamiento o las hidroeléctricas se destruyen o fallan parcialmente, el principal problema que se produce aguas abajo está relacionado con las inundaciones, el oleaje –sobre todo la ola de rotura– y el transporte de rocas y lodo. Pero, aunque los terremotos no provoquen la destrucción de estas obras, los fenómenos geológicos asociados con el sismo, tales como hundimientos del terreno, deslizamientos de tierra, caídas de roca y aludes de lodo empeoran la calidad del agua en tanto aumentan la turbidez y la sedimentación, cambian la concentración de los macroconstituyentes y/o la composición bacteriológica del agua, bloquean o interrumpen los cauces fluviales y obstaculizan el drenaje superficial.

Los terremotos acarrearán múltiples peligros en las presas debido a que se ha señalado (Wieland 2010):

- El movimiento de tierra causa vibraciones y distorsiones estructurales en las presas, estructuras mecánicas, obras de fábrica, elementos y equipos adyacentes y sus cimientos;
- Se pueden activar movimientos de fallas o de discontinuidades geológicas en la base de la presa cerca de fallas geológicas importantes, causando distorsiones estructurales en el terreno y en la obra;
- El desplazamiento de fallas en el fondo del reservorio puede causar oleaje en el embalse y generar caudales que sobrepasen la capacidad del aliviadero y la altura de coronación;
- Las caídas de rocas y deslizamientos de tierra pueden dañar las compuertas, agrietar los muros del vertedero, volcar los muros de contención, destruir las centrales de generación eléctrica y los equipos electromecánicos, ductos, túneles, mástiles de líneas de transmisión, etc.
- Los movimientos masivos de rocas y tierra que bloquean los ríos pueden formar diques temporales de retención de las aguas que más tarde pueden fallar o desbordarse causando nuevas inundaciones aguas abajo no necesariamente a lo largo de los cauces activos y también pueden provocar grandes olas en el acuatorio;
- La licuefacción o la densificación del suelo puede ser motivo de movimientos de rocas y suelos (desprendimientos, deslizamientos, deslaves) y de subsidencia y asentamientos del terreno, que también causan distorsiones en las estructuras de las presas y sus obras accesorias, así como modificaciones en la forma del embalse;
- El apilamiento de rocas y tierra es una causa adicional de distorsiones en las obras civiles y, sobre todo, en las estructuras de cierre del embalse;

- Los efectos de oleajes menores y de oscilaciones propias del nivel de agua almacenada como las ondas estacionarias del tipo seiches –aunque pueden producirse y deben ser tomadas en consideración– son de menor importancia respecto a las afectaciones que pueden provocar los terremotos sobre las presas.

La consideración más importante a tener en cuenta cuando se trata la relación entre las obras hidráulicas y los terremotos es el hecho, a veces olvidado, de que cada presa es siempre un prototipo no reproducible y único que ha sido diseñado, construido y normalmente operado bajo condiciones muy específicas, en un sitio con condiciones geológicas, geofísicas e hidrológicas y de peligros naturales casi exclusivas y, por lo común, irremplazables.

Lo mismo es válido para las infraestructuras vinculadas con el proyecto (cursos modificados de ríos, canales, estaciones de bombeo, urbanización e industrias locales desarrolladas en la cuenca regulada para aprovechar los beneficios de la obra). El modo en que estos efectos cambiantes en el territorio pueden afectar o ser afectados por los terremotos debe ser abordado cuidadosamente, incluso si las normas, códigos y reglamentos establecidos no cubren las necesidades de seguridad de las presas. Adicionalmente, aunque las conclusiones y métodos de las mejores prácticas internacionales pueden (y deben) ser tomados en consideración, debe tenerse en cuenta la singularidad de cada proyecto hidráulico y, sobre todo, que las observaciones y conclusiones derivadas del comportamiento de otras represas son sólo ilustrativas y no deben usarse para pronosticar el desempeño de una presa en particular.

En este punto hay que considerar otros dos aspectos: a) las particularidades de la estructura geológica y de la cuenca regulada artificialmente (aguas arriba y aguas abajo) y b) el efecto del embalse como agente productor de terremotos. La principal cuestión geomorfológica a tener en cuenta es la existencia de cauces de avenida y, sobre todo, de paleocauces enterrados (o no) abandonados del río principal y los tributarios que serán afectados. La desconsideración de esta característica puede magnificar las consecuencias de la licuefacción de los suelos, el hundimiento del terreno y, en consecuencia, el resquebrajamiento de las estructuras de hormigón.

En el primer caso, la respuesta diferente a las sacudidas en rocas terrígenas o duras es de especial consideración.

La licuefacción no es un problema en formaciones de rocas duras (pero en las regiones cársicas los sedimentos arcillosos que rellenan cuevas, cavidades o discontinuidades interconectados pueden volverse susceptibles de licuarse); de hecho, el mayor problema podría ser la densificación de rocas y rellenos y las diferencias en la compatibilidad geotécnica del relleno y la roca madre. Pero la licuefacción es un problema mayor que debe considerarse básicamente en secuencias terrígenas (como es el caso de la mayor parte de la vertiente colinosa del Perú, Ecuador y Colombia, donde se han construido la mayoría de los embalses de estos países). La problemática geotécnica se centra en el diferente comportamiento de los fenómenos de tensión-deformación de la típica secuencia litológica de areniscas y lutitas de esta zona, donde los deslizamientos de tierra son las características morfológicas más comunes. La licuefacción es generalmente ayudada por la elevación del nivel de las aguas subterráneas debido a los terremotos, que contribuyen a aumentar la humedad natural de las rocas.

Ecuador tiene una gran historia de terremotos y un gran desarrollo en la construcción de presas. Los recursos hídricos de la vertiente del Pacífico han sido regulados artificialmente para satisfacer las necesidades de abastecimiento de agua de la población (la mayoría de los habitantes de Ecuador vive en esta región), la agricultura, la industria y la energía. Varias cuencas hidrográficas de la vertiente del Pacífico muestran evidencias de estrés hidrológico y por otra parte la oferta hidrológica es menor en esta región que en el resto del país. Ecuador cuenta con 79 principales cuencas hidrográficas, 72 de las cuales se desarrollan en la vertiente del Pacífico.

La vertiente del Pacífico es la región sísmica más activa del país debido a las inestables relaciones tectónicas entre las placas de Nazca y América del Sur. También es un área propensa a los tsunamis porque los epicentros de los eventos macrosísmicos están muy cerca de la costa o en el lecho marino cercano. Esto permite el desarrollo de movimientos anormales de enormes masas de agua que, en el continente, se expresan como gigantescas olas que chocan contra las playas con suficiente energía para penetrar cientos de metros tierra adentro. Seis casos de macrosismos generadores de tsunamis han sido registrados instrumentalmente en Ecuador (Mw entre 6,8 y 8,8), así como cientos de terremotos, principalmente en la vertiente del Pacífico. Esta situación invita a actualizar los códigos y reglamentos nacionales sísmicos para el diseño, construcción, operación, la evaluación ambiental, la prevención de peligros y el monitoreo de las amenazas, como lo demostró el terremoto de Mw = 7,8 del 16 de abril de 2016.

En este trabajo se revisan algunas de las características geológicas, geomorfológicas, hidrológicas, hidráulicas y geofísicas más importantes del Ecuador y particularmente de la vertiente del Pacífico, sumamente inestable tectónicamente, enfocadas hacia la relación con la prevención y mitigación de los efectos de los terremotos sobre la infraestructura hidráulica y la preservación de los recursos hídricos (cantidad y calidad) del Ecuador Occidental.

CONSIDERACIONES SOBRE LA SEGURIDAD DE LAS PRESAS

Un sistema tan extenso de regulación artificial de las aguas superficiales exige un riguroso control de seguridad que debe comenzar desde la selección del sitio y de los estudios de prefactibilidad y debe continuar durante toda la vida útil del proyecto.

Las represas y embalses contribuyen de dos formas diferentes a la sismicidad local y regional: a) el llenado de agua del embalse puede ser causa de terremotos, así como la remoción de agua de las minas o el descenso del nivel del agua en el embalse, y b) el colapso de la presa es una de las causas más catastróficas de desastres hidrológicos capaces de producir enormes daños a la infraestructura y provocar altas pérdidas de vidas humanas.

Las presas y su infraestructura son comúnmente diseñadas conservadoramente, construidas adecuadamente y meticulosamente explotadas. Pero es innegable que los beneficios que ofrece la regulación artificial van junto con un alto riesgo para las personas, las propiedades y el medio ambiente; sobre todo si los terremotos se conjugan con las llamadas “causas ocultas del fallo de presas”, a saber: a) cambios en el uso de la tierra; b) cambios en los patrones meteorológicos; c) diseños obsoletos y d) falta de mantenimiento y financiación.

Vistas en detalle, las más importantes causas ocultas que agravarán los terremotos y que pueden aparecer combinadas, son las siguientes.

- Monitoreo inadecuado
- Defectos de construcción
- Inundaciones inesperadas o repentinas no previstas
- Inundaciones que superan la capacidad proyectada y construída de descarga y almacenamiento
- Deslizamientos de tierra debido a fuertes lluvias
- Diseño insuficiente debido a regulaciones laxas y reducción de costos
- Mantenimiento deficiente
- Inestabilidad geológica del valle, la base de la presa y o reactivación de fallas geológicas
- Bombardeo en situaciones de guerra
- Subsistencia causada por la sobreexplotación de aguas subterráneas o incluso de pozos petroleros
- La erosión de ductos
- Reactivación de sumideros
- Destrucción de los estribos, los aliviaderos y las compuertas

En 2016, la Comisión Internacional de Grandes Presas ha indicado que el desbordamiento de una presa es un serio indicador de colapso de la estructura. El desbordamiento puede deberse a un diseño inadecuado del vertedor, al bloqueo del aliviadero por escombros o al asentamiento (hundimiento) de la cortina de la presa. También los defectos de la cimentación, incluyendo el asentamiento y la inestabilidad de las laderas, son otra causa de fallas de la presa. La tubificación y el sifonamiento es decir, la erosión interna causada por la filtración, es la tercera causa principal. La filtración ocurre a menudo alrededor de estructuras hidráulicas, tales como tuberías y vertedores; a través de madrigueras de animales; alrededor de raíces de vegetación leñosa; y por grietas en el cuerpo de las presas, infraestructura asociada y la cimentación. Otras causas de rotura incluyen fallas estructurales de los materiales utilizados en la construcción de presas y mantenimiento inadecuado.

El colapso de una presa no es un fenómeno común, pero cuando ocurre es extremadamente perjudicial para la vida humana y la economía. La síntesis siguiente, tomada de Le Poudre (2015), muestra algunos casos notables.

La ruptura de la presa de Vajont, Italia, en 1963 causó 2000 fallecidos y es un caso muy interesante porque el área había sido afectada a menudo por terremotos menores pero que nunca dañaron la presa. En octubre de 1963, mientras el embalse estaba en proceso de llenado, un terremoto sacudió el área provocando un deslizamiento de tierra de cerca de 260 millones de metros cúbicos en el embalse. En apenas 45 segundos, toda la zona se sumergió en el agua y unos 50 millones de m³ de agua fueron liberados de la presa en forma de una ola de 250 metros de altura que destruyó por completo las aldeas cercanas.

La represa de Fujinuma en Japón es otro caso complejo relacionado con el terremoto de Tohoku del 11 de marzo de 2011. El terremoto de Tohoku causó un tsunami extremadamente destructivo que mató a miles de personas, provocó una licuefacción generalizada y resultó en decenas de miles de millones de dólares en daños. El modelado matemático realizado por estos

autores predijo grandes desplazamientos laterales (metros) de la cara aguas abajo debido a agitación sísmica, fundamentalmente del tipo de deslizamientos de tierra y un asentamiento importante de la cortina. Este asentamiento hizo que la presa fuera vulnerable al desbordamiento y finalmente a su destrucción. La represa falló de 20 a 25 minutos después del terremoto cuando el embalse, casi lleno, sobrepasó la corona de la presa. Al día siguiente se inspeccionaron 252 presas y se comprobó que siete estaban dañadas. Seis presas de tierra tenían fisuras poco profundas en sus coronas y el lago retenido por una presa de gravedad de hormigón mostró una ligera caída en la ladera. Cuatro presas, entre ellas las de Fujinuma, eran inaccesibles y no pudieron ser inspeccionadas en los días posteriores, según el informe del Comité Nacional Chino sobre Grandes Presas en 2011.

Otro caso notable fue el terremoto de Filipinas de julio 16 de 1990. Con una magnitud de 7,7 se expresó aparentemente en dos centros de liberación de energía activados en un intervalo de pocos segundos. Seis presas (tabla 1) cerca del epicentro quedaron destruidas y las inundaciones afectaron un área total de 52 000 km², dos veces y media la superficie de la república de El Salvador.

Tabla 1. Presas colapsadas como consecuencia del terremoto de Filipinas de julio 16 de 1990

Obra /Objetivo	Año de construcción	Tipo de presa	Sistemas adicionales	Altura de coronación (m)
Hidroeléctrica Ambuklao	1956	tierra-roca		130
Hidroeléctrica Binga	1960	tierra-roca		102
Derivadora Masiway	1980	tierra		25
Derivadoras Patabangan	1977	tierra	Aya Creek	102
			Aya Creek 1	107
			Patabangan	107

Las presas de cola son aquellas diseñadas para servir como contención de relaves de minas, materiales que quedan después del proceso de separación de la fracción útil (ganga) de un mineral (Le Poudre 2015). También se denominan vertederos de mina, lodos, colas, residuos, residuos de lixiviación o lodos. Sin embargo, aunque no es el tema principal de este artículo debe mencionarse que la falla de presas de colas es particularmente catastrófica debido a la enorme cantidad de lodo y materiales tóxicos que se liberan. Para ahorrar costos, es práctica usual que los diques se construyan a menudo con pendientes empinadas utilizando la fracción gruesa de los relaves.

Mantener estos depósitos operacionales es una de las tareas más difíciles en la gestión de desechos de las minas. Generalmente, estas instalaciones de contención son vulnerables debido a las siguientes razones:

- Construcción del dique con materiales residuales de las operaciones mineras
- Elevación gradual de la altura de los cierres de presas aparejado con un aumento de efluentes
- Falta de reglamentación sobre los criterios de diseño, especialmente en los países en desarrollo
- Alto costo de mantenimiento después del cierre de la mina

RECURSOS HÍDRICOS DE ECUADOR

Ecuador tiene una importante oferta hídrica y por lo tanto un enorme volumen de recursos hídricos, pero desigualmente distribuidos según la fisiografía del país. El balance hídrico global es positivo (SENAGUA 2011), pero hay algunas cuencas hidrográficas en la vertiente del Pacífico que muestran algún déficit durante el año, particularmente en las provincias de Manabí, las más afectadas por el terremoto del 16 de abril de 2016, así como las zonas orientales y meridionales que rodean la Bahía de Guayaquil.

La demanda de agua también se distribuye asimétricamente debido a la concentración irregular de la población y a la infraestructura social, económica y cultural.

La mayor parte de la población se concentra en la región de la Sierra y en la cuenca del Guayas, en la costa del Pacífico, pero los recursos hídricos más importantes (88%) se encuentran en la parte oriental, en la Cuenca Amazónica, donde sólo vive el 4% de la población del país. SENAGUA (2011) señala que varias cuencas están muy próximas al estrés hídrico y la escasez de agua, como es el caso de Carchi, Cojimíes, Jama, Chone, Portoviejo, Jipijapa, Guayas, Zapotal, Taura, Balao y Arenillas.

En esas cuencas se necesita un enfoque diferenciado de la gestión del agua. Históricamente, Ecuador ha desarrollado una estrategia de regulación artificial de la escorrentía superficial. La principal solución para la gestión de las aguas superficiales en detrimento de los recursos hídricos subterráneos, menos estudiados y explotados localmente (pero también sobreexplotados localmente), ha sido la construcción y operación de docenas de presas de almacenamiento y derivación, canales de riego, sistemas multipropósito de abastecimiento doméstico, riego y control de alimentos. aunque en casi todos los embalses se confrontan problemas comunes de eutrofización.

En los últimos años Ecuador ha terminado e iniciado la operación de los denominados Mega Proyectos Multipropósito: Derivación Daule-Vinces, Derivación Chongón-San Vicente, Control de Inundaciones en el Río Bulubulu, Control de Inundaciones Naranjal, Control de Inundaciones Cañar y Chone Multipropósito.

La agricultura, con casi el 80% del volumen utilizado, es el consumidor dominante de agua en el país, seguido por el uso doméstico (13%) y la industria (7%). La hidroenergía utiliza el 53% del total de los recursos hídricos regulados y abastece casi el 48% de la energía total generada en el país. En este momento es la mayor demanda no consuntiva de agua en Ecuador.

EL CONCEPTO DE RIESGO GEOLÓGICO

Según lo definido por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR) (<http://www.preventionweb.net/english/professional/terminology>) el peligro geológico es un proceso geológico o fenómeno que puede causar pérdida de la vida de las personas, lesiones u otros impactos a la salud, daños a la propiedad, pérdida de medios de vida y servicios, alteración social y económica o daños ambientales.

Los riesgos geológicos incluyen procesos internos de la tierra, tales como terremotos, actividad volcánica y emisión de gases, así como otros procesos geofísicos relacionados con

ellos, tales como movimientos de masas, deslizamientos de tierra, desprendimientos de rocas, colapsos superficiales y flujos de detritos o barro. Los factores hidrometeorológicos son fuerzas de consideración en algunos de estos procesos. Los tsunamis asociados con los sismos son difíciles de categorizar. Aunque son provocados por terremotos submarinos y otros eventos geológicos, son esencialmente un proceso oceánico que se manifiesta como un peligro relacionado con el agua costera.

CONTEXTO GEOLÓGICO Y SISMOTECTÓNICO DE ECUADOR

En Ecuador, la placa de Nazca subduce bajo el Bloque Norte Andino. Esta subducción desencadenó, durante los últimos 110 años, seis grandes terremotos de magnitud mayor o igual a 6,8 (tabla 2). La figura 1 muestra las principales características tectónicas de los vectores de velocidad del Norte de América del Sur y del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) compilados de diferentes estudios por Colmenares and Zoback (2003).

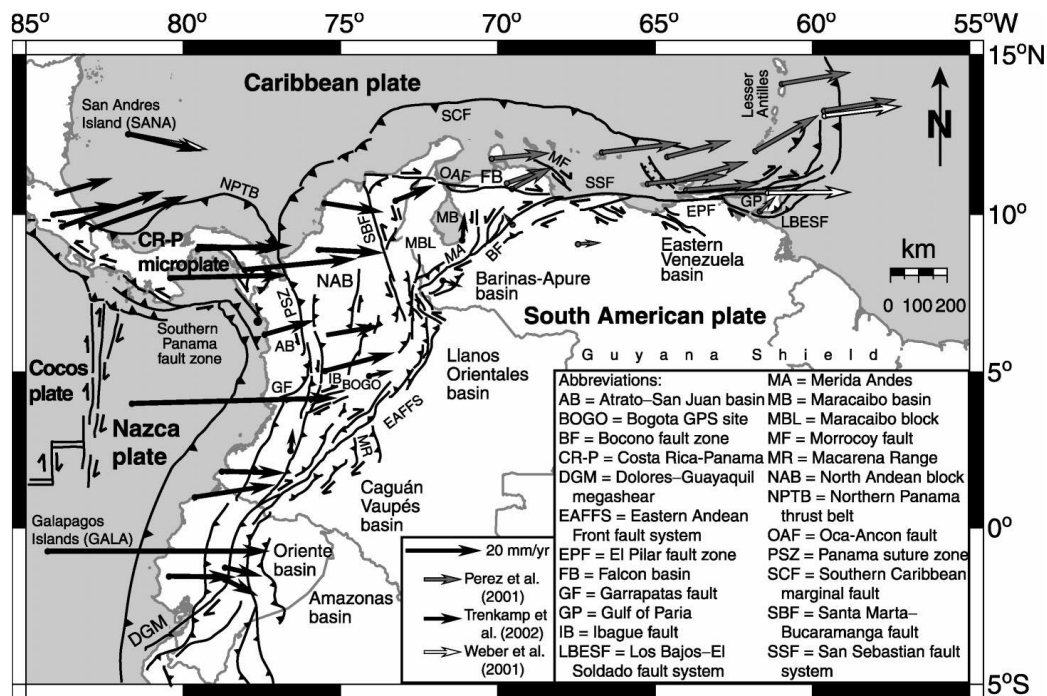


Figura 1. Vectores de velocidad tectónica del Norte de América del Sur

En la figura 1 los vectores indican las velocidades con respecto a América del Sur. La localización del vector de la isla de Galápagos (GALA) se ha desplazado hacia el este (la localización original está en 90,38W y 0,748S), según Colmenares and Zoback (2003).

La Provincia Ecuatoriana de Estrés Tectónico de los Andes incluye los Andes ecuatorianos y la parte sur de los Andes colombianos hasta la frontera entre la cuenca Caguan-Vaupé y la cuenca de los Llanos Orientales, al este de la Cordillera Oriental de Colombia.

La dirección de la tensión en esta provincia muestra que la compresión máxima tiende aproximadamente en la dirección E-W. Una dirección secundaria y no menos importante, la NW-SE es la de los sistemas de falla reactivados documentados por el autor a lo largo de la parte inferior del río Jama después del terremoto del 16 de abril de 2016. Casi 12 niveles de grietas paralelas afloran en superficie potenciando deslizamientos menores y cierto levantamiento local (figura 2 y figura 3).

Tabla 2. Principales terremotos en el Ecuador compilado de diversas fuentes (todos tsunamigénicos)

Fecha	Magnitud Mw	Localización
1906, 31 de enero	8,8	Provincia de Esmeraldas, epicentro en el Océano Pacífico entre San Lorenzo y Tumaco (Colombia)
1933, 2 de octubre	6,9	Epicentro de la provincia de Guayas en el mar, cerca de Salinas (Puntilla), frente a La Libertad, península de Santa Elena
1953, 12 de diciembre	7,8	Provincia de El Oro, epicentro en el mar, cerca de Puerto Bolívar
1958, 19 de enero	7,1	Provincia de Esmeraldas, epicentro en el mar frente a Bahía de Caraquez
1979, 12 de diciembre	7,8	Conocido como el terremoto de Colombia, el epicentro se localizó en el Océano Pacífico, cerca de Tumaco, Colombia
1998, 4 de agosto	6,8	Provincia de Manabí, epicentro en el mar, cerca de la costa de Boca de Briceño
2016, 6 de abril	7,8	Provincia de Manabí, epicentro en Pedernales



Figura 2. Sistema de grietas paralelas reactivadas durante el terremoto del 16 de abril de 2016 en el tercio inferior del río Jama, Manabí (foto del autor)



Figura 3. El nivel superior de las grietas paralelas se reactivó durante el terremoto del 16 de abril de 2016 elevando parte de la ciudad de Jama y dislocando varias casas (foto del autor)

El campo de esfuerzos es compresional, ya que la mayoría de los terremotos se caracterizan por fallas de empuje (con alguna falla de deslizamiento). Se cree que dos terremotos debidos a fallas normales están asociados con la alta topografía de los Andes (Zoback 1992).

La convergencia de las placas de Nazca y de América del Sur en las provincias andinas de Ecuador ha sido demostrada por estos autores basándose en el campo de esfuerzos altamente compresivos y la dirección E-W observada. Esta es la causa principal de los terremotos observados en Ecuador y, por lo tanto, los patrones geológicos de la secuencia estratigráfica involucrada y sus propiedades geotécnicas, así como la expresión morfológica de la cuenca sedimentaria tiene que ser tomada en cuenta para cualquier análisis y control de peligro geológico y de evaluación del riesgo.

Es particularmente importante considerar que cuatro placas -las placas de Sudamérica, el Caribe y Nazca y la microplaca Costa Rica-Panamá- interactúan en la región. Sus características geológicas, la velocidad y la dirección del movimiento, la distribución del campo de estrés y las secuencias de rocas que involucran deben estudiarse cuidadosamente cuando se quiere evaluar el riesgo y la vulnerabilidad de las obras hidráulicas.

En este sentido es muy importante la Cresta de Carnegie (Graindorge et al. 2004), una meseta oceánica masiva de 300 km de ancho, que se eleva 1500 m desde el fondo oceánico. Esta estructura (figura 4), ubicada en la Trinchera de Ecuador, se ha asociado con todos los terremotos mayores (> 7,7) ocurridos en el Margen Ecuatoriano en el siglo pasado por ser una

zona activa con una convergencia hacia el este de $5,4 \pm 0,2$ cm / año entre las placas de Nazca y América del Sur. Una tensión elástica significativa se acumula a través del margen, dando como resultado una estructura parcialmente acoplada (Graindorge et al. 2004), (Molerio 2016). La tensión actual proviene de la contribución de dos fenómenos diferentes: 1) la deformación elástica asociada con el bloqueo parcial de la subducción a lo largo del margen ecuatoriano y 2) el movimiento a largo plazo del Bloque Norandino con respecto a la placa de Suramérica. La estructura de subducción es el resultado de la interacción entre el hotspot de Galápagos y el centro de propagación de placas de Cocos-Nazca durante el Neógeno. La Cresta Carnegie empuja los terrenos volcánico-oceánicos acrecidos del margen ecuatoriano.

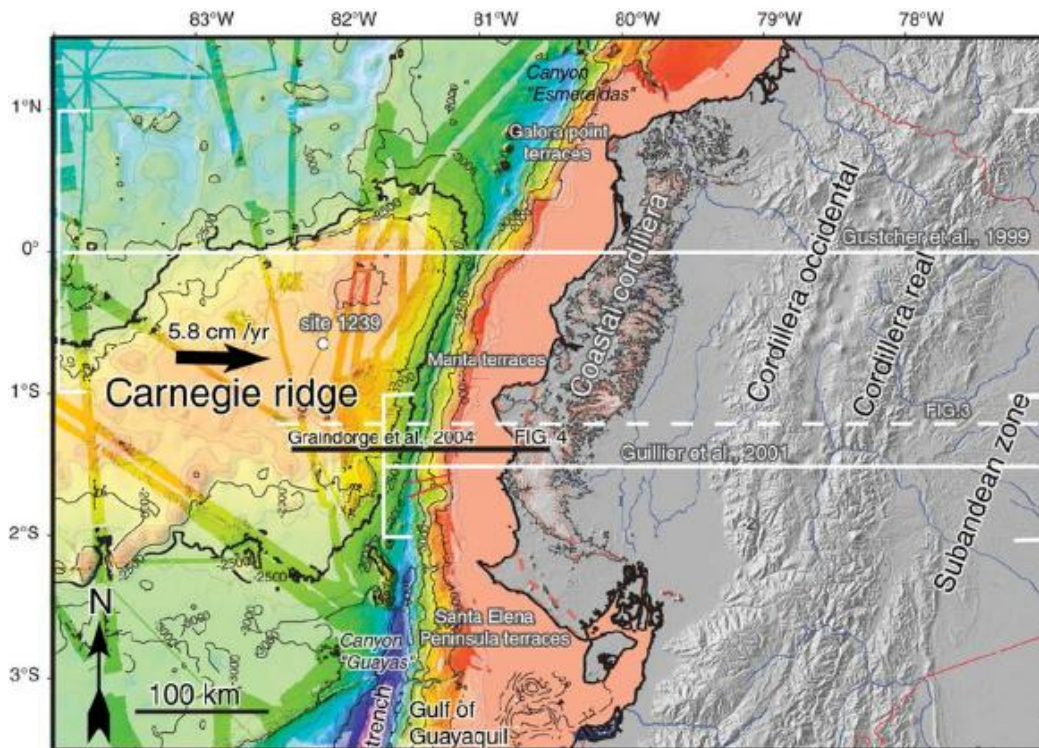


Figura 4. Cresta de Carnegie y dirección de los movimientos
(según Michaud et al. 2009)

El Ecuador continental puede ser dividido en tres regiones fisiográficas principales que reflejan otras tantas provincias geológicas. La región andina separa la cuenca del Oriente en el este, que es una cuenca sedimentaria post-arco, de edad mesozoico-cenozoica que incluye una secuencia de carbonatos de plataformas sobre un antiguo sótano cratónico, de la llanura costera al oeste (Ortiz 2013).

El contacto tectónico entre los Andes Orientales y la Cuenca del Oriente constituye una zona de pliegues y empujes que buzcan al NNE y W, conocida como Zona Subandina. A lo largo de la mayor parte del Ecuador, los Andes están divididos en dos cordilleras paralelas, la Occidental y la Real (Cordillera Oriental), separadas por un graben central relleno de rocas vulcanógeno-sedimentarias de edad Plioceno-Cuaternario, el llamado Graben Interandino, cuya base es poco conocida, aunque los datos gravimétricos sugieren que se trata de una prolongación oculta de la Cordillera Real, constituida principalmente por rocas metamórficas de edad Paleozoico-

Mesozoico, intrusionadas por cinturones granitoides de tipo S e I, y cubiertas por depósitos volcánicos del Cenozoico moderno.

La Cordillera Occidental, por su parte, consta casi enteramente de basaltos de la corteza oceánica con edades que van desde el Cretácico Temprano hasta el Cretácico Superior, así como por rocas ultramáficas, turbiditas marinas, una secuencia de arco de isla oceánica andesítico-basáltico, una secuencia de turbiditas marinas del Paleoceno al Eoceno y una secuencia continental del Eoceno Superior al Oligoceno. Estas formaciones están intrusionadas por granitoides Eocénicos y de tipo I más jóvenes.

La Costa es la región más baja al oeste de los Andes y comprende un grupo de cuencas desde el Cretácico hasta el Cenozoico, apoyadas por rocas oceánicas que están expuestas localmente en las cordilleras costeras.

La configuración actual de Ecuador es el resultado de una evolución transpresiva que comenzó como una subducción oblicua durante el Paleoceno. Desde el Cretácico Superior, esta región ha sido marcada por la acreción de terrenos oceánicos que ha sido anexionada al borde occidental de la Cordillera Real y al dominio continental. Con el final de la acreción en el Paleoceno, comenzó el desarrollo de este sistema de subducción oblicua. La dirección actual de convergencia es N83°. Esta dirección de convergencia estable indujo una fuerte división horizontal de la deformación y las tensiones en la placa superior induciendo el escape norte del Bloque Norandino. La tasa de convergencia de la placa de Nazca es de aproximadamente 56 mm / año con respecto a la Placa Sudamericana.

La Cresta Carnegie se ha asociado con todos los macroterremotos ocurridos en Ecuador (<7,7). Es una estructura masiva, engrosada, de 300 km de ancho, que se eleva a 1500 m sobre el lecho marino adyacente. Se localiza en la depresión ecuatorial y muestra una importante actividad que se mueve hacia el este, entre las placas de Nazca y América del Sur, a una tasa aproximada de $5,4 \pm 0,2$ cm/año.

El Alto Batimétrico de la Cresta Carnegie tiene una dirección aproximada E-W, y penetra en la zona de subducción entre los 1° N y 2° S de latitud y, de acuerdo con la edad de la colisión entre la cresta y la depresión, está en el rango de 1 y 15 Ma. La llegada de la Cresta a la Depresión ecuatorial desencadenó el movimiento del Bloque Norandino. Eventualmente, la subducción oblicua de la placa de Nazca y la subducción del Carnegie podrían conducir a la ruptura del Bloque Norandino.

EVALUACIÓN DEL PELIGRO DEL FALLO DE PRESAS

En realidad, los casos de fallo de presas han sido muy esporádicos, pero siempre son catastróficos y extremadamente costosos en términos de vidas humanas, económicos y ambientales. Las acciones de prevención, mitigación y corrección dependen de la disponibilidad de recursos financieros y técnicos y deben considerar: a) conciliar los requisitos de seguridad y economía de los proyectos pendientes y b) reforzar la estabilidad de la infraestructura hidráulica construida. Sin embargo, la seguridad de las obras hidráulicas es un imperativo ético y debe establecerse jurídicamente para prevenir riesgos. Las autoridades encargadas de la gestión de los

recursos hídricos, la defensa civil y la seguridad pública deben apoyarse en un marco legal riguroso y actualizado para controlar, desde el mismo momento de inicio de los proyectos, el riesgo de falla de las presas.

En general, la situación es de compleja solución, por muy variadas razones de ingeniería, financieras, sociales y culturales. En muchos países del Trópico Húmedo la mayor parte de las presas tienen más de treinta años de operación y no pocas de ellas superan los 50 años de funcionamiento, lo que demanda mayores niveles de seguridad para las personas y las propiedades ubicadas aguas abajo de las presas. La imposibilidad práctica de emprender la construcción de nuevas obras debido a restricciones sociales, económicas y ambientales puesto que ya se utilizaron los llamados "sitios o cierres buenos" para la construcción de presas. Para un mayor desarrollo es necesario invertir más dinero y recursos técnicos porque hay que evaluar aquellos "sitios no tan buenos". De hecho, aquellos que presentan mayores dificultades geológicas y constructivas.

Sin embargo, crece la necesidad de optimizar la gestión de los sistemas de recursos hídricos y aumentar la capacidad de regularlos eficientemente para responder a una demanda creciente; todo ello dentro de un contexto de aparente aumento de fenómenos climatológicos e hidrológicos extremos (inundaciones y sequías).

Es en este marco que resulta particularmente importante estimar los riesgos relativos de seguridad de la propia estructura, así como los relativos a la capacidad de satisfacción de las demandas de agua, una necesidad urgente de mantener adecuadamente las presas, mejorar el funcionamiento y aumentar la capacidad de regulación. De hecho, es esencial identificar niveles aceptables de riesgo en ambos casos.

Mientras que en el enfoque clásico de seguridad geológica e hidrológica las inundaciones y terremotos incorporan algunos aspectos probabilísticos asociados con el período de retorno, la probabilidad de ocurrencia de tales situaciones queda enmascarada, entre otros factores, mientras se asume un nivel fijo previo de agua en el embalse. A su vez, los factores parciales de seguridad pueden no correlacionarse con las probabilidades de fallo y sólo permiten criterios de aceptación o rechazo.

El enfoque tradicional de las presas y la seguridad de los embalses es que los riesgos se controlan a través de reglas y procedimientos de monitoreo que han sido sancionados por la práctica. De esta forma, conservadora y prudente, se verifican los factores de seguridad. Sin embargo, en estos análisis clásicos de seguridad, las hipótesis probabilísticas basadas en pseudo carga y factores parciales de seguridad, no responden a las necesidades mencionadas anteriormente (De Membrillera et al. 2015).

Los enfoques basados en la matemática de la gestión de la seguridad de las presas que aplican rigurosos análisis de riesgos deben incluirse desde las primeras etapas del proyecto, revisados durante el diseño y monitoreados como parte del control de autor durante la construcción tomando en consideración las dificultades para manejar los riesgos de probabilidad muy baja asociados con el fallo de las presas.

En la fase operativa los controles de seguridad deben ser considerados como parte del monitoreo de operaciones de rutina y contabilizando la categoría de vulnerabilidad de las represas y de su área de influencia como parte del control de riesgos de eventos naturales extremos (terremotos, erupciones volcánicas, y sus combinaciones).

En general, no sólo en Ecuador sino en otros sitios de Centro y Suramérica donde el autor ha estudiado estos problemas (El Salvador, Guatemala, Nicaragua, Panamá, Venezuela) las principales consideraciones incluyen: a) el envejecimiento y deterioro del parque de presas existentes, b) la existencia de otras presas en operación que no cumplen con las solicitudes sísmicas o hidrológicas locales o regionales; que no se ajustan a las normas o reglamentos vigentes (donde existan) o las mejores prácticas internacionales (cuando proceda) y c) que los estándares locales y regionales requieren ser actualizados y conciliados con el registro sísmico con el fin de que las presas operacionales verifiquen los actuales criterios de seguridad necesarios o deseables.

No menos importante es el hecho de que existe un creciente requisito social para cuantificar el riesgo asociado con eventos catastróficos debido a la concentración de la población y las actividades económicas aguas abajo de los ríos artificialmente regulados. También en América Latina –en general– existe una decreciente tendencia de la inversión pública y una ascendente tendencia para que el usuario final pague por la infraestructura que le presta servicios cada vez más gestionados por el sector privado.

CONCLUSIONES

En el Ecuador tres importantes eventos sísmicos y millares de réplicas han coincidido con el auge del período de construcción y operación de la infraestructura hidráulica del país, por lo que se requiere de una actualización de su estabilidad y estado de seguridad. El sistema hidráulico ecuatoriano puede haber sido afectado por diferentes eventos geológicos, hidrológicos e ingenieriles tales como la fatiga de materiales, pequeñas –incluso sistemáticas– roturas, la alteración del equilibrio geodinámico de apoyo y cimentación de las estructuras y obras de fábrica (presa, aliviadero, muros de contención, estribos, obras de toma) y de la cuenca (cambios en los cauces de los ríos, erosión, licuefacción, asentamientos, solifluxión, sufusión, deslizamientos, creeping y movimientos de rocas), o cambios en la composición química del agua que pueden acelerar procesos de corrosión o incrustación.

La seguridad de las presas es parte de un problema mayor de la gestión de los recursos hídricos. Esa gestión involucra riesgos geológicos, hidrológicos y tecnológicos, por lo que la desconsideración de este conjunto de factores conducirá siempre a un sistema de suministro de agua deficiente y probablemente ineficiente. Los sistemas de abastecimiento de agua se someten a pruebas duras en situaciones extremas, ya que se espera que todos los servicios públicos resuelvan las necesidades básicas de la población en todo momento. En el caso de los eventos extremos discutidos en este artículo, se espera que, en caso de terremotos, el sistema de suministro de agua sea lo suficientemente estable para que no falle la disponibilidad de agua. Por lo tanto, en zonas de peligro sísmico, incluir el riesgo geológico en la gestión del agua es tan importante como la obligada inserción de los peligros hidrológicos.

REFERENCIAS

- Colmenares L. and Zoback M. D.** (2003). “Stress field and seismotectonics of northern South America”. *Geology*; 31 (8): 721-724, ISSN 0016-7606, August 2003; Geol. Soc. of America, Reston, Virginia, USA.
- De Membrillera M. G.; Escuder I.; González J. y Altarejos L.** (2015). “Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management”. *Proc. 3rd International Forum on Risk analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*, CRC Press, Taylor & Francis, Valencia, España, 395:
- Graindorge D.; Calahorrano A.; Charvis Ph.; Collot J. Y. and Bethoux N.** (2004). “Deep structures of the Ecuador convergent margin and the Carnegie Ridge, possible consequence on great earthquakes recurrence interval”. *Geophysical Research Letters*, vol. 31, no. 4, pp. 2-5, L04603, doi:10.1029/2003GL018803, 5: ISSN1944-8007, Malden MA 02148, USA.
- Le Poudre Ch. D.** (2015). “Examples, statistics and failure modes of tailings dams and consequences of failure”. SNC-LAVALIN, Montreal, Canadá, Extraído de: <http://www.esaa.org/wp-content/uploads/2015/10/15-LePoudre.pdf>. en Octubre 2015.
- Michaud F.; Witt C. and Royer J. Y.** (2009). “Influence of the subduction of the Carnegie volcanic ridge on Ecuadorian geology: Reality and fiction”, *in* Kay, S.M., Ramos, V.A., and Dickinson, W.R., eds., “Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision”. Geological Society of America, Memoir 204. ISBN-10: 0813712041, Malden MA 02148, USA.
- Molerio L.** (2016). “El terremoto del 16 de abril en Ecuador”. *CubaGeográfica*, 3 – 2016:22, ISSN 2473-8239, GeoPortal Cuba, Miami, USA.
- Ortiz O. C.** (2013). “Sismotectónica y peligrosidad sísmica en Ecuador”. Tesis de Maestría en Geología Ambiental y Recursos Geológicos, Especialidad en Riesgos Geológicos y Gestión Territorial, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España
- SENAGUA** (2011). “Estado situacional del Ecuador en cuanto al manejo de los recursos hídricos. Oferta y demanda hídrica en Ecuador”. Proyecto CEPAL-GIZ. Quito, Ecuador. Extraído de: http://www.cepal.org/deype/noticias/noticias/1/44071/SENAGUA_oferta-demanda.pdf en Julio 2011.
- Wieland M.** (2010). “Dam safety and earthquakes”. *International Water Power and Dam Construction. Newsletter*, ISSN: 0306-4000, London, UK, 20 September 2010.
- Zoback M. L.** (1992). “First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project”. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, p. 11,703–11,728, ISSN:2156-2202, American Geophysical Union, Virginia, USA,.