



## ASPECTOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA POTENCIAL PÉRDIDA DE VIDAS COMO CONSECUENCIA DE UNA ROTURA DE PRESA DE COLAS

***Miguel Huamán,***

*Anddes, Perú*

*miguel.huaman@anddes.com*

***Jhoel Huanchi- Anddes, Perú - jhoel.huanchi@anddes.com; Elizabeth Quispe- Anddes, Perú - elizabeth.quispe@anddes.com***

### ***RESUMEN***

Los estándares actuales para el manejo y diseño de presas de colas, como la Canadian Dam Association (CDA) e International Council on Mining and Metals (ICMM), contemplan la clasificación de la presa basada en las consecuencias de la ruptura de esta, donde uno de los aspectos más importantes son la estimación de la población en riesgo y la potencial pérdida de vidas según las huellas de inundación obtenidas desde un análisis de rotura de presa que impacta a algún centro poblado. La estimación de pérdida de vidas está relacionada a 3 factores importantes como el número de personas impactadas por la huella de inundación, conocimiento del riesgo de las personas expuestas, y severidad del flujo.

El artículo tiene como objetivo revisar algunas consideraciones utilizadas para la estimación de la potencial pérdida de vidas como resultado de una rotura de presa de colas; estas consideraciones fueron asumidas sobre la base del método A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure (DSO-99-06) y la experiencia en el desarrollo de simulaciones y clasificación de presas de colas. Finalmente, la estimación de la potencial pérdida de vidas también es importante para la realización del análisis de riesgos de presas y otros estudios asociados con la seguridad de las presas.

**Palabras claves:** Rotura de presa de colas 1, potencial pérdida de vidas 2, clasificación de presas 3.

Los actuales estándares aplicados al diseño de estructuras mineras como “Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams” desarrollado por la Canadian Dam Association (CDA 2019), y “Global de Gestión de relaves(colas) para la Industria Minera” elaborado por el International Council on Mining & Metals (ICMM 2020), tienen como objetivos fundamentales alcanzar el daño nulo a las personas y ambiente, así como la cero tolerancia a las fatalidades humanas. Asimismo, los criterios de diseño para las etapas de construcción, operación y cierre de los depósitos de colas, están sujetas a la clasificación por consecuencia de una hipotética falla de la presa, donde se considere un mecanismo de falla creíble (según ICMM) en las condiciones de sunny day y rainy day para estimar las pérdidas incrementales. Entonces, según la CDA e ICMM los niveles de clasificación por consecuencias para las presas de colas son Baja, Significativa, Alta, Muy Alta y Extrema, las cuales se definen de acuerdo con la evaluación de las pérdidas incrementales en los siguientes aspectos:

- Población potencial en riesgo.
- Pérdida potencial de vidas.
- Medio ambiente.
- Salud, ámbito cultural y social.
- Infraestructura y economía.

Por lo tanto, la pérdida potencial de vidas representa uno de los aspectos importantes para la clasificación o análisis de riesgos de los depósitos de colas; algunas metodologías para la estimación de pérdidas de vidas son las siguientes: “A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure” o llamada DSO-99-06 elaborada por Wayne J. Graham en 1999, “Flood Comparison” desarrollado por United Research Services (URS) a solicitud de la Federal Emergency Management Agency (FEMA) en 2008, entre otros.

Se han desarrollado algunas metodologías para determinar las pérdidas de vidas en inundaciones debido a tormentas, ciclones, y colapsos de reservorios de agua. Asimismo, varias de estas metodologías están vinculadas con modelos hidráulicos para fluidos newtonianos, los cuales no serían muy representativos para la estimación de la potencial pérdida de vidas ante una potencial falla de una presa de colas. Sin embargo, los métodos de Graham (DSO-99-06) y Flood comparison (FEMA) pueden ser adaptados para evaluar la pérdida de vidas en un flujo de detritos o lodos.

## 2.1. MÉTODO DE GRAHAM (DSO-99-06)

Según Graham, existen muchos factores que determinan el número de fatalidades o pérdida de vidas, dentro de los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Causa y tipo de falla de la presa.
- Número de personas en riesgo.
- Escaso tiempo de advertencia.
- Velocidad y profundidad del flujo de inundación.
- Disponibilidad de señales sensoriales para las personas en riesgo.
- Tiempo de la ocurrencia de la inundación (día o noche), día de semana, y periodo del año.
- Clima (viento temperatura, etc.).
- Actividad de las personas.
- Salud y condición física de las personas en riesgo.
- Tipo de infraestructura impactada.
- Facilidades para evacuar.

Sin embargo, el número de pérdida de vidas o fatalidades está influenciado por 3 factores principales como el número de personas en riesgo o personas que se localizan dentro de la huella de inundación, la cantidad de advertencias en el área de inundación, y la severidad del flujo de inundación. Entonces, la mayoría de las fallas de presas que causaron la mayor tasa de mortalidad, destruyeron la infraestructura de la zona y no se emitieron alertas a la población en riesgo.

Por lo tanto, según esta metodología la potencial pérdida de vidas (LOL) es equivalente al producto de la tasa de mortalidad y la población en riesgo (PAR); asimismo, la tasa de mortalidad está relacionada según la severidad de la inundación, tiempo de advertencia y comprensión de la severidad de la inundación, según lo mostrado en la Tabla 1.

**Tabla 1 – Tasas de mortalidad recomendadas para estimar la pérdida de vidas - Graham**

| Severidad de Inundación | Tiempo de Advertencia (minutos) | Comprensión de la Severidad de la Inundación | Tasa de Mortalidad (Fracción de personas en riesgo que se prevé que mueran)  |                |
|-------------------------|---------------------------------|--|--|----------------|
|                         |                                 |  | Sugerido   | Rango sugerido |
| ALTO                    | Sin advertencia                 | No aplica                                    | 0.75   | 0.30 – 1.00    |
|                         | 15 a 60                         | Vaga   | Utilice los valores que se muestran arriba y aplíquelos al número de personas que permanecen en la llanura de inundación por falla de la presa después de que se emiten las advertencias. No se proporciona orientación sobre cuántas personas permanecerán en la llanura aluvial. | 0.30 – 1.00    |
|                         |                                 | Precisa                                      |  |                |
|                         | Más de 60                       | Vaga   |  |                |
|                         |                                 | Precisa                                      |  |                |
| MEDIO                   | Sin advertencia                 | No aplica                                    | 0.15   | 0.03 – 0.35    |
|                         | 15 a 60                         | Vaga   | 0.04   | 0.01 – 0.08    |
|                         |                                 | Precisa                                      | 0.02   | 0.005 – 0.04   |
|                         | Más de 60                       | Vaga   | 0.03   | 0.005 – 0.06   |
|                         |                                 | Precisa                                      | 0.01   | 0.002 – 0.02   |
| BAJO                    | Sin advertencia                 | No aplica                                    | 0.01   | 0.0 – 0.02     |
|                         | 15 a 60                         | Vaga   | 0.007  | 0.0 – 0.015    |
|                         |                                 | Precisa                                      | 0.002  | 0.0 – 0.004    |
|                         | Más de 60                       | Vaga   | 0.0003   | 0.0 – 0.0006   |
|                         |                                 | Precisa                                      | 0.0002   | 0.0 – 0.0004   |

La severidad de la inundación está relacionada con las características del flujo en la población inundada, donde principalmente se evalúa la velocidad y profundidad de flujo, y esta severidad se clasifica en Bajo, Medio y Alto. La severidad de inundación baja ocurre cuando la cimentación queda expuesta, pero la infraestructura aun no colapsa; en estos casos la profundidad del flujo es menor a aproximadamente 3 m (10 ft), así como el parámetro DV se estime menor a 4.6 m<sup>2</sup>/s. La severidad media supone a la destrucción de algunas casas, y aún quedan arboles de pie, en este caso la profundidad del flujo es superior a 3 m o el parámetro DV superior a 4.6 m<sup>2</sup>/s. mientras que la severidad alto se presenta cuando el flujo arrasa con toda la infraestructura (viviendas, arboles, etc.), es decir es una inundación muy profunda que arrasa con todo.

Otro parámetro importante es el tiempo de advertencia para cualquier población ubicada aguas abajo de la presa. Asimismo, el tiempo de advertencia no necesariamente es iniciado en el momento de falla de la presa, sino este puede ser iniciado un tiempo previo, según los niveles de alerta establecidos en los depósitos de colas.

Finalmente, el entendimiento o comprensión de la inundación corresponde a la acción de la población en riesgo en momentos de una rotura de presa. Este parámetro puede clasificarse como vago y precisa. Vago corresponde cuando los emisores no comprenden la verdadera magnitud de la inundación; mientras que precisa, los emisores tienen una excelente comprensión de la severidad del flujo, asimismo, estos puntos están relacionados al plan de evacuación y simulacros realizados en el área de potencial inundación.

## 2.2. METODO FLOOD COMPARISON (FMEA)

La Federal Emergency Management Agency (FMEA) contrató a la URS Corporation para el desarrollo de la herramienta risk prioritization para estimar los valores de riesgos relativos a sus

presas. Asimismo, esta es una metodología simple que determina la razón de fatalidad o mortalidad con relación a la ubicación de la población (aguas abajo de la presa) y la relación entre el caudal pico producto de la rotura (en la población afectada), y el caudal pico correspondiente a un periodo de retorno de 10 años, la Tabla 2 indica las razones de fatalidad para este método.

**Tabla 2 - Razón de Fatalidades - Flood Comparison (FMEA)**

| Razón de caudal pico de falla de presa y caudal de 10 años de periodo de retorno | Razon de Fatalidades |                     |                      |
|--|----------------------|---------------------|----------------------|
|  | De 0.0 a 3.0 millas  | De 3.0 a 7.0 millas | De 7.0 a 15.0 millas |
| Mayor a 100  | 0.75                 | 0.5                 | 0.37                 |
| 50 a 100   | 0.5                  | 0.33                | 0.25                 |
| 30 a 50  | 0.25                 | 0.2                 | 0.13                 |
| 20 a 30  | 0.2                  | 0.15                | 0.1                  |
| 10 a 20  | 0.1                  | 0.08                | 0.05                 |
| 5 a 10   | 0.02                 | 0.015               | 0.01                 |
| 3 a 5  | 0.01                 | 0.007               | 0.005                |
| 1 a 3  | 0.005                | 0.003               | 0.002                |
| Menor a 1  | 0.001                | 0.0001              | 0                    |

### 2.3. VARIACION AL METODO DE GRAHAM

El método de Graham fue desarrollado para fluidos newtonianos; sin embargo, este método puede ser utilizado para determinar las pérdidas de vidas inducidas por fluidos no newtonianos (flujo de detritos, lodos o colas); previamente a la aplicación de la metodología, se debe realizar una simulación hidráulica para fluidos no newtonianos utilizando modelos apropiados (Flo 2d, Riverflow2d, entre otros) con la finalidad de obtener velocidades, profundidades y tiempo de llegada del flujo ante una rotura de presa de colas. Asimismo, la severidad de la inundación (bajo, medio y alto) en la zona impactada por el flujo de Colas puede ser estimada con los criterios para mapas de amenazas de Suiza (OFEE et al. 1997), donde se clasifica la intensidad del flujo de lodo o detritos en función de la profundidad y el producto de la velocidad y profundidad (VD), según se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3 - Intensidad de eventos para flujos de lodos y detritos**

| Intensidad de eventos para flujos de lodos y detritos | Profundidad máxima D (m) | VD (m <sup>2</sup> /s)                             |
|---|--------------------------|--|
| Alto  | D > 1.0 m                | VD > 1.0 m <sup>2</sup> /s                         |
| Medio   | 0.2 m < D < 1.0 m        | 0.2 m <sup>2</sup> /s < VD < 1.0 m <sup>2</sup> /s |
| Bajo  | D < 0.2 m                | VD < 0.2 m <sup>2</sup> /s                         |

Para la aplicación y comparación de las 3 metodologías de estimación de pérdidas de vidas, descritas en el capítulo previo, se han considerado los resultados (profundidad y velocidad máxima, tiempo de impacto, caudal pico, entre otros) de la simulación de rotura de presa de un depósito de colas ubicado en la cordillera occidental del Perú.

De acuerdo con el análisis de rotura se estimó la liberación de 2.8 MMC de colas y un caudal

pico de 2367 m<sup>3</sup>/s, asimismo, el material liberado se desplazaría hacia aguas abajo de la presa siguiendo el curso de un río e impactando en su recorrido accesos, puentes, instalaciones de mina, centros poblados 1 y 2, etc., tal como se muestra en la Figura 1.



Figura 1 - Huella de impacto ante una potencial rotura de presa

Según la huella de inundación, las colas (relaves) liberadas por la falla de la presa llegarían al centro poblado 1 (ubicado a 3.4 km de la presa) en un tiempo aproximado de 14 min; mientras, el centro poblado 2 (ubicado a 11 km de la presa) sería impactado por las colas en un tiempo aproximado de 36 min.

La población potencial en riesgo se define como el número de personas afectadas por la huella de inundación de la rotura de presa. La población en riesgo se cuantificó con base al número de viviendas afectadas y la relación de habitantes por vivienda estimada a partir de data censal nacional (número total de hogares y población). En la Tabla 4 se presenta la población afectada en los centros poblados 1 y 2.

Tabla 4 - Población potencial en riesgo

| Centro poblado | Censo nacional  |                 | Población potencial en riesgo |                     |                    |
|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|---------------------|--------------------|
|                | Población total | Viviendas total | Habitantes por vivienda       | Viviendas afectadas | Personas afectadas |
| 1              | 482             | 244             | 2                             | 112                 | 224                |
| 2              | 3648            | 1212            | 3                             | 149                 | 447                |

Para emplear el **método de Graham** se clasificó el área de inundación en función al nivel de severidad baja, media y alta, tal como se muestra en la Figura 2, para cuantificar la población afectada según la severidad de inundación en cada centro poblado. En el centro poblado 1 se estimó la afectación de 14, 18 y 192 personas con una severidad baja, media y alta; y en el centro poblado 2 el impacto de 21, 75 y 351 personas, respectivamente.



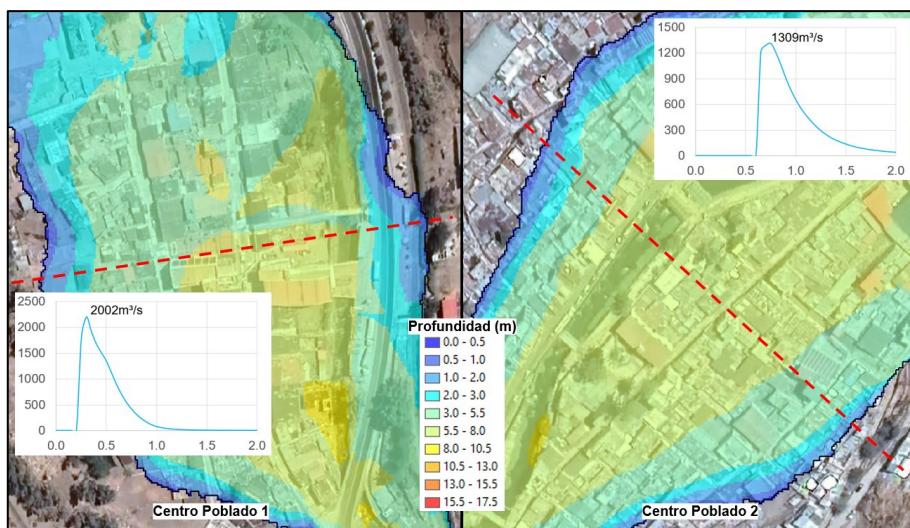
Figura 2 - Severidad de la inundación - Método de Graham

Y usando el tiempo de llegada de las colas a las zonas afectadas se definió el tiempo de advertencia, por lo cual, el centro poblado 1 (tiempo de impacto de 14 min) se clasifica como sin advertencia, mientras, el centro poblado 2 (tiempo de impacto de 36 min) cuenta con una advertencia de 15 a 16 min; asimismo, la comprensión de la severidad se consideró como vaga porque no se cuenta con un sistema de alerta y plan de evacuación. Con estos factores se selecciona la tasa de mortalidad y se estima la perdida potencial de vidas. En la Tabla 5 se presenta la perdida potencial de vidas en los centros poblados 1 y 2 estimada por la metodología de Graham.

Tabla 5 - Perdida potencial de vidas - Método de Graham

| Centro poblado | Población potencial en riesgo | Severidad | Tiempo de advertencia | Comprensión de severidad | Tasa de mortalidad | Perdida potencial de vidas |     |
|----------------|-------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------------|--------------------|----------------------------|-----|
| 1              | 14                            | Bajo      | Sin advertencia       | Vaga                     | 0.01               | 0.1                        | 413 |
|                | 18                            | Medio     | Sin advertencia       | Vaga                     | 0.15               | 2.7                        |     |
|                | 192                           | Alto      | Sin advertencia       | Vaga                     | 0.75               | 144.0                      |     |
| 2              | 21                            | Bajo      | 15 a 60 min           | Vaga                     | 0.007              | 0.1                        | 413 |
|                | 75                            | Medio     | 15 a 60 min           | Vaga                     | 0.04               | 3.0                        |     |
|                | 351                           | Alto      | 15 a 60 min           | Vaga                     | 0.75               | 263.3                      |     |

Para aplicar el **método de flood comparison** se determinó el caudal pico de las colas que llega a las áreas afectadas, obteniendo de la simulación de rotura un caudal pico de 2002 y 1309 m<sup>3</sup>/s en los centros poblados 1 y 2, respectivamente, tal como se muestra en la Figura 3. Asimismo, se estimó el caudal ( $T_r = 10$  años) de 54 y 80 m<sup>3</sup>/s de la corriente de agua que pasa por los centros poblados 1 y 2, respectivamente. La variación del caudal pico de la rotura se da por la atenuación del movimiento de Colas a lo largo de curso de inundación (C.P. 1 a 3.4 km y C.P. 2 a 11 km) y la variación del caudal del río ( $T_r = 10$  años) se da por corrientes de agua afluentes al curso principal de inundación.


**Figura 3 - Caudal pico - Método flood comparison**

Con la información de caudales se define la razón de caudal pico de la rotura y caudal del río ( $T_r=10$  años) para los centros poblados 1 y 2 valores de 41 y 16, respectivamente. El centro poblado 1 (3.4 km - 2.1 millas) se ubica en el rango de 0 a 3 millas, y el centro poblado 2 (11 km - 6.8 millas) se encuentra en el rango de 3 a 7 millas. Con estos factores se elige la tasa de mortalidad y se estima la perdida potencial de vidas. En la Tabla 6 se presenta la perdida potencial de vidas en los centros poblados 1 y 2 estimada por la metodología flood comparison.

**Tabla 6 - Perdida potencial de vidas - Método flood comparison**

| Centro poblado | Población potencial en riesgo | Caudal pico ( $m^3/s$ ) | Caudal 10años ( $m^3/s$ ) | Razón caudal | Distancia a presa      | Tasa de mortalidad | Perdida potencial de vidas |
|----------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------|------------------------|--------------------|----------------------------|
| 1              | 224                           | 2202                    | 54                        | 30 a 50 (41) | 0 a 3millas (2.1milas) | 0.25               | 56.0                       |
| 2              | 447                           | 1309                    | 80                        | 10 a 20 (16) | 3 a 7millas (6.8milas) | 0.08               | 35.8                       |

Para utilizar la variación al método de Graham se delimitó el área de inundación siguiendo los criterios para mapas de amenazas de Suiza (OFEE et al. 1997). En la Figura 4 se clasificó la severidad de la inundación en función a la profundidad “D” (m) y en la Figura 5 en base al producto de la velocidad y profundidad “VD” ( $m^2/s$ ). Observando ambas figuras, la mayor severidad se da considerando la categorización de la huella con la profundidad “D” (m).


**Figura 4 - Severidad de la inundación - Variación al método de Graham - D (m)**



**Figura 5 - Severidad de la inundación - Variación al método de Graham - VD (m<sup>2</sup>/s)**

Al igual que el método de Graham, se definió el tiempo de advertencia como el tiempo de impacto de las zonas afectadas y la comprensión de la severidad como vaga, con ello se escogió la tasa de mortalidad para estimar la perdida potencial de vidas. En la Tabla 7 y 8 se presenta la perdida potencial de vidas en los centros poblados 1 y 2 estimada por la variación de la metodología de Graham considerando el “D” (m) y el “VD” (m<sup>2</sup>/s), respectivamente.

**Tabla 7 - Perdida potencial de vidas - Variación al método de Graham - D (m)**

| Centro poblado | Población potencial en riesgo | Severidad | Tiempo de advertencia | Comprensión de severidad | Tasa de mortalidad | Perdida potencial de vidas |     |
|----------------|-------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------------|--------------------|----------------------------|-----|
| 1              | 0                             | Bajo      | Sin advertencia       | Vaga                     | 0.01               | 0.0                        | 503 |
|                | 0                             | Medio     | Sin advertencia       | Vaga                     | 0.15               | 0.0                        |     |
|                | 224                           | Alto      | Sin advertencia       | Vaga                     | 0.75               | 168.0                      |     |
| 2              | 0                             | Bajo      | 15 a 60 min           | Vaga                     | 0.007              | 0.0                        | 365 |
|                | 0                             | Medio     | 15 a 60 min           | Vaga                     | 0.04               | 0.0                        |     |
|                | 447                           | Alto      | 15 a 60 min           | Vaga                     | 0.75               | 335.3                      |     |

**Tabla 8 - Perdida potencial de vidas - Variación al método de Graham - VD (m<sup>2</sup>/s)**

| Centro poblado | Población potencial en riesgo | Severidad | Tiempo de advertencia | Comprensión de severidad | Tasa de mortalidad | Perdida potencial de vidas |     |
|----------------|-------------------------------|-----------|-----------------------|--------------------------|--------------------|----------------------------|-----|
| 1              | 12                            | Bajo      | Sin advertencia       | Vaga                     | 0.01               | 0.1                        | 365 |
|                | 18                            | Medio     | Sin advertencia       | Vaga                     | 0.15               | 2.7                        |     |
|                | 194                           | Alto      | Sin advertencia       | Vaga                     | 0.75               | 145.5                      |     |
| 2              | 96                            | Bajo      | 15 a 60 min           | Vaga                     | 0.007              | 0.7                        | 365 |
|                | 66                            | Medio     | 15 a 60 min           | Vaga                     | 0.04               | 2.6                        |     |
|                | 285                           | Alto      | 15 a 60 min           | Vaga                     | 0.75               | 213.8                      |     |

Finalmente, en la Tabla 9 se presenta el resumen de la perdida potencial de vidas estimada mediante las 3 metodologías descritas en el presente artículo. Se concluye que para el ejemplo analizado el menor número de pérdidas de vidas se obtiene con el método flood comparison, y el mayor valor se consigue con la variación al método de Graham - D (m).



**Tabla 9 - Comparativa de perdida potencial de vidas**

| Centro poblado | Población potencial en riesgo | Perdida potencial de vidas |                         |                               |                        |
|----------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------|
|                |                               | Método de Graham           | Método flood comparison | Variación al método de Graham |                        |
|                |                               |                            |                         | D (m)                         | VD (m <sup>2</sup> /s) |
| 1              | 224                           | 147                        | 56                      | 168                           | 148                    |
| 2              | 447                           | 266                        | 36                      | 335                           | 217                    |
| Total          | 671                           | 413                        | 92                      | 503                           | 365                    |

A continuación, se mencionan las conclusiones del artículo:

Es necesario realizar la estimación de pérdidas de vidas para la clasificación de presas de colas de acuerdo con los estándares de la CDA e ICMM; para ello, se realizarán simulaciones de roturas de presa (fluidos no newtonianos) que representen la huella de inundación sobre centros poblados.

Existen varios métodos para estimar la pérdida de vidas; uno de los más utilizados es el método de Graham donde la potencial pérdida de vidas (LOL) es equivalente al producto de la tasa de mortalidad y la población en riesgo (PAR), y la tasa de mortalidad se determina con la severidad de la inundación, tiempo de advertencia y comprensión de la severidad de la inundación.

Para una mejor cuantificación de la potencial pérdida de vidas, la severidad de la inundación (bajo, medio y alto) puede ser estimada con los criterios para mapas de amenazas de Suiza (OFEE et al. 1997), donde se clasifica la intensidad del flujo de lodo o detritos en función de la profundidad y el producto de la velocidad y profundidad (VD).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A continuación, se presentan las referencias bibliográficas:

Canadian Dam Association, 2019. Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams. *Technical Bulletin*. Canadá.

Dam Sector, 2011. Estimating Loss of Life for Dam Failure Scenarios. U.S. Department of Homeland Security, Estados Unidos de Norteamérica.

Duane M. McClelland and David S. Bowles, 2002. Estimating Life Loss for Dam Safety Risk Assessment. Institute for Water Resources. *Institute for Dam Safety Risk Management*, Estados Unidos de Norteamérica.

International Council on Mining & Minerals (ICMM), 2020. Estándar Global de Gestión de Colas Para la Industria Minera, Reino Unido.

Wayne J. Graham, 1999. *A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure*, Sedimentation & River Hydraulics. U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation Dam Safety Office Denver, Colorado, Estados Unidos de Norteamérica.