

**CONSECUENCIAS AMBIENTALES POR FALLA O ROTURA DE PRESAS EN EL
MARCO DEL ANÁLISIS DE RIESGOS**

ROGER RODRÍGUEZ MORENO

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA
MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL
ÉNFASIS: PROFUNDIZACION EN RECURSOS HIDRAULICOS Y MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ, ABRIL 2014**

**CONSECUENCIAS AMBIENTALES POR FALLA O ROTURA DE PRESAS EN EL
MARCO DEL ANÁLISIS DE RIESGOS**

ROGER RODRÍGUEZ MORENO

Tesis de grado para optar al título de Magister

Director: Jairo A. Romero Rojas

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA
MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL
ÉNFASIS: PROFUNDIZACION EN RECURSOS HIDRAULICOS Y MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ, ABRIL 2014**

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, Abril de 2014

A Dios por darme la inteligencia para sacar adelante mis proyectos, a mis padres por darme la fuerza y perseverancia para no olvidarlos, a mi esposa por apoyarme y ser partícipe de mí día a día y a mis hermanas por darme la alegría que se necesita para alcanzar mis objetivos.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Ingeniero Jairo Albero Romero Rojas, quien fue la persona que oriento mi trabajo de grado, me ayudó en la definición de los objetivos, y hace que este objetivo personal sea una realidad.

A Eduardo Triana, por su colaboración en la definición de la temática de mi trabajo de grado y sus aportes en la comprensión del análisis de riesgos por falla o rotura de presas.

A Guillermo Castaño, por su guía en el entendimiento del evento de rotura aguas abajo de la presa y la valiosa contribución en la determinación, potencial evaluación y posibles manejos de las consecuencias ambientales.

A Carolina Vásquez, por sus valiosos comentarios y aportes en la definición de los impactos ambientales y casos de falla de presa a nivel mundial.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	8
OBJETIVOS	9
Objetivo General.....	9
Objetivos Específicos	9
1 INVENTARIO Y CLASIFICACIÓN DE PRESAS EN COLOMBIA.....	10
1.1 CLASIFICACIÓN DE PRESAS.....	10
1.1.1 Clasificación ICOLD	10
1.1.2 Clasificación por material.....	10
1.1.3 Clasificación por tipo	10
1.2 CLASIFICACIÓN DE PRESAS EXISTENTES EN COLOMBIA	10
2 NORMATIVIDAD ASOCIADA A RIESGOS EN COLOMBIA	17
3 CASOS DE FALLA O ROTURA DE PRESA EN EL MUNDO	23
4 ANÁLISIS DE RIESGOS POR FALLA O ROTURA DE PRESAS	41
4.1 ANÁLISIS DE RIESGO.....	42
4.2 EVALUACIÓN DEL RIESGO.....	45
4.3 CONTROL DEL RIESGO	45
5 TIPOS DE CONSECUENCIAS POR LA FALLA O ROTURA DE UNA PRESA .	47
5.1 TIPOS DE CONSECUENCIAS	47
5.2 CONSECUENCIAS O EFECTOS SOCIOECONÓMICOS	48
5.3 CONSECUENCIAS O EFECTOS AMBIENTALES (FISICOBÍOTICOS)	50
6 VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS POR LA FALLA O ROTURA DE UNA PRESA	57
7 ESTRATEGIAS DE MANEJO DE CONSECUENCIAS AMBIENTALES POR LA FALLA O ROTURA DE UNA PRESA	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
REFERENCIAS	80
Anexo 1. Información Grandes Presas en Colombia.....	84
Anexo 2. Área inundable aguas abajo Hidrosogamoso.....	95
Anexo 3. Árbol de consecuencias fisicobióticas e indicadores de medición.....	97

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1-1. Presas pequeñas existentes en Colombia.....	11
Cuadro 1-2. Grandes Presas existentes en Colombia	15
Cuadro 2-1. Normatividad asociada a la gestión del riesgo, planes de contingencia o a atención de desastres.....	19
Cuadro 3-1. Principales eventos de falla o rotura de presa a nivel mundial	39
Cuadro 5-1. Componentes y elementos que pueden verse afectados por el evento de rotura de la presa de Hidrosogamoso.....	52

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 4-1. Esquema general para la Gestión de Riesgo en presas	41
Figura 4-2. Esquema del proceso de Análisis del Riesgo	43
Figura 5-1. Estructura General para la Estimación de Consecuencias en el Análisis de Riesgos.....	49
Figura 5-2. Localización Proyecto Hidroeléctrico del río Sogamoso.....	51
Figura 6-1. Procedimiento general para la estimación de consecuencias de inundación	58
Figura 7-1. Determinación de la tolerabilidad de los riesgos y determinación de medidas para su reducción.....	73

INTRODUCCIÓN

La Gestión del Riesgo aplicada a la seguridad de presas ha sido estudiada, mejorada y empleada a nivel mundial, principalmente como resultado de eventos que se han presentado y que han ocasionado consecuencias, en algunos casos, devastadoras para la zona aguas abajo de la presa.

Sin embargo, dentro de la estimación de consecuencias, paso indispensable dentro del Análisis de Riesgos, se han incluido generalmente las de tipo social (personas en riesgo y pérdida de vidas) y económicas (daños por inundación y efectos sobre el recurso hídrico), pero no se ha abordado el tema de las consecuencias de tipo ambiental (afectación a los componentes físicos y bióticos).

En Colombia, si bien se han incorporado elementos para la gestión del riesgo, estos se han enfocado a la atención a desastres, normalmente de tipo natural. Así mismo, la normatividad para la realización de análisis de riesgos y principalmente, para casos de rotura de presa, es por decir menos, nula; esto es notorio incluso en la elaboración de Planes de Contingencia para embalses ya construidos, dentro de los cuales, por ser un evento extremadamente fortuito, no se considera el análisis de este riesgo.

Por lo anterior, se elabora el presente trabajo de grado con dos grandes ejes: el primero enfocado a realizar una recopilación de información asociada al análisis de riesgos a nivel mundial para eventos de falla o rotura de presa, que permita tener un acercamiento con el tema e incluyendo una recopilación de estos casos a lo largo de la historia, y la normatividad colombiana asociada al análisis de riesgos.

El segundo, y que conforma el eje principal del trabajo, está enfocado a realizar una primera propuesta para lograr la incorporación del componente ambiental (fiscobiótico) en la estimación de consecuencias por eventos de rotura de presa. Para esto, se empleó información general y cualitativa de una presa existente en Colombia, Hidrosogamoso, la cual cuenta con Licencia Ambiental y se encuentra en fase de construcción.

Dentro del Estudio de Impacto Ambiental elaborado para dicho proyecto, se incluyó una descripción del área aguas abajo de la presa, lo que permitió elaborar un análisis de los impactos que se podrían generar por el evento de rotura y así establecer los diferentes elementos físicos y bióticos que pueden verse afectados, tanto para los ecosistemas terrestres como los acuáticos; este análisis fue plasmado en un árbol de consecuencias, a partir del cual, se definieron unos indicadores que permitieran valorarlas cuantitativamente.

Finalmente, se proponen algunas estrategias de manejo (prevención, compensación, mitigación o corrección) para las consecuencias ambientales ocasionadas por el evento de rotura, de acuerdo con el árbol de consecuencias elaborado.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar los riesgos ambientales existentes aguas abajo de la zona de embalse, por falla o rotura de una presa.

Objetivos Específicos

- Realizar un inventario y clasificación de las presas existentes en Colombia, según categorías definidas por su capacidad, tipo y material.
- Establecer el marco legal existente en Colombia sobre análisis de riesgos, evaluación y requerimientos de seguridad en presas.
- Reseñar casos de fallas de presas y sus consecuencias a nivel mundial.
- Establecer los pasos requeridos para el análisis de riesgos por falla o rotura de presas.
- Determinar las consecuencias fisicobióticas, sociales y económicos por la falla o rotura de una presa.
- Definir las variables y metodologías para medir y valorar los efectos fisicobióticos, sociales y económicos por la falla o rotura de una presa.
- Formular posibles estrategias de manejo de consecuencias ambientales por una eventual falla o rotura de una presa.

1 INVENTARIO Y CLASIFICACIÓN DE PRESAS EN COLOMBIA

Existen varios tipos de clasificación de presas, según diferentes parámetros. A continuación se presentan algunos de ellos, los cuales serán empleados para clasificar las presas existentes en Colombia.

1.1 CLASIFICACIÓN DE PRESAS

1.1.1 Clasificación ICOLD

De acuerdo con lo establecido en la Comisión Internacional de Presas Grandes (Internacional Comision on Large Dams-ICOLD), las presas pueden clasificarse en dos categorías:

- Grandes Presas: Dimensiones: altura > 15 m, corona > 500 m, embalse > 1 Hm³ o Capacidad de desagüe > 2000 m³/s, también por características especiales de cimentación o diseño.
- Pequeñas Presas: Todas las que no cumplan con las condiciones anteriores.

1.1.2 Clasificación por material

De acuerdo con el material con el que fue construida la presa, éstas pueden ser de:

- Tierra: Materiales compactados, no rígidos, seleccionados y con un grado de humedad óptimo. Pueden haber presas en tierra homogéneas o zonificadas por diferentes granulometrías.
- Enrocados: grandes diámetros.
- Concreto: Concreto convencional o CCR “concreto compactado con rodillo”.

1.1.3 Clasificación por tipo

Otro tipo de clasificación de presas está dado por la forma de resistir el empuje hidrostático. De esta manera, se tienen:

- De Arco o Bóveda: Trasmiten el empuje al terreno. Curvatura vertical u horizontal.
- De Gravedad: Resisten por el peso propio (macizas y aligeradas).
- De Arco Gravedad: Resisten por combinación de su peso y transmisión al terreno.

1.2 CLASIFICACIÓN DE PRESAS EXISTENTES EN COLOMBIA

De acuerdo con la información consultada en entidades oficiales, empresas, bibliotecas, páginas web; entre otras: Unidad de Planeación Minero Energética - UPME (2007), Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR (1984), CAR (1975), CAR - Gomez (1980), EMGESA (2013), EMGESA (2013), Empresa de

Energía de Bogotá - EEEB (1993), Empresas Públicas de Medellín - EPM (2008), EPM (2013), Grosso (2004), Ministerio de Comercio (2013), Sierra (2011), ISAGEN (2013), EPSA (2013), INGETEC (2013), se presenta a continuación una recopilación de datos de las presas existentes en Colombia.

Presas pequeñas

En Colombia existen aproximadamente 90 presas pequeñas asociadas generalmente con Pequeñas Centrales Hidroeléctricas - PCH. En las PCH la fuente de energía está constituida por un flujo del agua que por medio de obras civiles es conducida a los centros de generación o casa de máquinas, lo cual puede ser realizado mediante una canal de derivación, con un pequeño embalse, como una combinación de ambos o directamente sobre el cauce del río (Sierra, 2011). En el Cuadro 1-1 se presenta la relación de las presas pequeñas identificadas.

Cuadro 1-1. Presas pequeñas existentes en Colombia

No.	PCH	Capacidad Efectiva (MW)	Localización	Operador
1	Agua Fresca	7,29	Jericó, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
2	Alto Tuluá	19,9	Tuluá, Valle	Empresa de Energía del Pacífico S.A. E.S.P.
3	Amaime	19,9	Palmira, Valle	Empresa de Energía del Pacífico S.A. E.S.P.
4	Amalfi	0,81	Amalfi, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
5	América	0,41	Medellín, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
6	Asnazu	0,45	Suarez, Cauca	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.
7	Ayura	18	Envigado, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
8	Barroso	19,9	Salgar, Antioquia	La Cascada S.A.S E.S.P.
9	Bayona	0,6	Bohemia, Quindío	Empresa Multipropósito de Calarcá S.A. E.S.P.
10	Bello	0,35	Bello, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
11	Belmonte	3,4	Pereira, Risaralda	Empresa de Energía de Pereira S.A E.S.P
12	Calderas	19,9	San Carlos, Antioquia	ISAGEN S.A. E.S.P.
13	Campestre (Calarcá)	0,7	Bohemia, Quindío	Empresa Multipropósito de Calarcá S.A. E.S.P.
14	Campestre (EPM)	0,87	Medellín, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
15	Caracolí	2,6	Caracolí, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
16	Caruquia	9,5	Santa Rosa de Osos, Antioquia	La Cascada S.A.S E.S.P.
17	Cascada	3	Bucaramanga, Santander	Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.
18	Cementos del Nare	4,5	Pto Nare (La Mag), Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.

Cuadro 1-1. Presas pequeñas existentes en Colombia (continuación)

No.	PCH	Capacidad Efectiva (MW)	Localización	Operador
19	Charquito	19,4	Soacha, Cundinamarca	EMGESA S.A E.S.P
20	Coconuco	4,5	Popayán, Cauca	Empresa Municipal de Energía Eléctrica S.A. E.S.P.
21	Currucucues	1,25	Rovira, Tolima	ENERMONT S.A. E.S.P
22	El Bosque	2,28	Armenia, Quindío	Energía Renovable de Colombia S.A E.S.P.
23	El Limonar	18	San Antonio De Tena, Cundinamarca	EMGESA S.A E.S.P
24	Florida	19,9	Popayán, Cauca	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.
25	Guacaica	0,9	Neira, Caldas	Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P.
26	Guanaquitas	9,5	Santa Rosa de Osos, Antioquia	La Cascada S.A.S E.S.P.
27	Hidromontañitas	19,9	Don Matías, Antioquia	CELSIA S.A E.S.P
28	Insula	19	Chinchiná, Caldas	Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P.
29	Intermedia	1	Manizales, Caldas	Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P.
30	Inza	0,75	Inza, Cauca	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.
31	Iquira I	4,32	Iquira, Huila	Electrificadora del Huila S.A. E.S.P.
32	Iquira II	5,4	Iquira, Huila	Electrificadora del Huila S.A. E.S.P.
33	Julio Bravo	1,5	Pasto, Nariño	Centrales Eléctricas de Nariño S.A. E.S.P.
34	La Cascada - Abejorral	0,45	Abejorral, Antioquia	ENERVÍA S.A. E.S.P.
35	La Cascada (Antioquia)	2,3	San Roque, Antioquia	La Cascada S.A.S E.S.P.
36	La Herradura	19,8	Cañasgordas, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
37	La Junca	19,4	La Mesa, Cundinamarca	EMGESA S.A E.S.P
38	La Pita	1,42	Garzón, Huila	Electrificadora del Huila S.A. E.S.P.
39	La Tinta	19,4	La Mesa, Cundinamarca	EMGESA S.A E.S.P
40	La Vuelta	11,6	Cañasgordas, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
41	Manantiales	3,15	Bello, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
42	Mirolindo	2,4	Ibagué, Tolima	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.
43	Mondomo	0,75	Santander de Q., Cauca	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.
44	Municipal	2	Manizales, Caldas	Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P.
45	Nima	6,7	Cali, Valle	Empresa de Energía del Pacífico S.A. E.S.P.
46	Niquia	19	Bello, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.

Cuadro 1-1. Presas pequeñas existentes en Colombia (continuación)

No.	PCH	Capacidad Efectiva (MW)	Localización	Operador
47	Nuevo Libare	5,1	Dos Quebradas, Risaralda	Empresa de Energía de Pereira S.A E.S.P
48	Nutibara	0,75	Medellín, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
49	Ovejas	0,82	Buenos Aires, Cauca	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.
50	Pajarito	4,9	Yarumal, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
51	Palmas San Gil	15	San Gil, Santander	Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.
52	Pastales	0,7	Pastales, Tolima	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.
53	Patico - La Cabrera	1,48	Popayán, Cauca	GENELEC LTDA. E.S.P.
54	Piedras Blancas	5	Medellín, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
55	Prado IV	5	Prado, Tolima	Empresa de Energía del Pacífico S.A. E.S.P.
56	Puente Guillermo	1	Puente Nacional, Santander	ENERCO S.A. E.S.P.
57	Remedios	0,75	Remedios, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
58	Rio Abajo	0,9	San Vicente, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
59	Rio Bobo	4	Santa Rosa, Cauca	Centrales Eléctricas de Nariño S.A. E.S.P.
60	Rio Cali	1,8	Cali, Valle	Empresa de Energía del Pacífico S.A. E.S.P.
61	Rio Frio I	1,69	Riofrio, Valle	Compañía de Electricidad de Tuluá S.A. E.S.P.
62	Rio Frio II	10	Riofrio, Valle	Compañía de Electricidad de Tuluá S.A. E.S.P.
63	Rio Ingenio	0,18	Sandona, Nariño	Centrales Eléctricas de Nariño S.A. E.S.P.
64	Rio Mayo	19,8	San Pablo, Nariño	Centrales Eléctricas de Nariño S.A. E.S.P.
65	Rio Palo	1,44	Caloto, Cauca	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.
66	Rio Piedras	19,9	Jericó, Antioquia	CELSIA S.A E.S.P
67	Rio Recio	0,3	Lerida, Tolima	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.
68	Rio Sapuyes	1,65	Tuquerres, Nariño	Centrales Eléctricas de Nariño S.A. E.S.P.
69	Riofrio (Támesis)	1,2	Támesis, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
70	Riogrande I	19	Don Matías, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
71	Riogrande I (Menor)	0,3	Don Matías, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
72	Rionegro	9,6	Puerto Salgar, Cundinamarca	Empresa de Energía de Cundinamarca S.A. E.S.P.
73	Rumor	2,5	Tuluá, Valle	Compañía de Electricidad de Tuluá S.A. E.S.P.

Cuadro 1-1. Presas pequeñas existentes en Colombia (continuación)

No.	PCH	Capacidad Efectiva (MW)	Localización	Operador
74	Sajandi	3,2	Patía (El Bordo), Cauca	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.
75	San Antonio	19,4	San Antonio de Tena, Cundinamarca	EMGESA S.A E.S.P
76	San Cancio	2	Manizales, Caldas	Central Hidroeléctrica de Caldas S.A. E.S.P.
77	San Francisco (Putumayo)	0,47	San Francisco, Putumayo	GENERPUTUMAYO S.A.S. E.S.P.
78	San José	0,38	Pensilvania, Caldas	Generadora Colombiana de Electricidad S.C.A. E.S.P
79	San José de la Montaña	0,4	S. José la Monta, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
80	Santa Ana	8	Ubala, Cundinamarca	EMGESA S.A E.S.P
81	Santa Rita	1,3	Andes, Antioquia	ENERCO S.A. E.S.P.
82	Santiago	2,8	Santo Domingo, Antioquia	Generamos Energía S.A. E.S.P.
83	Silvia	0,38	Silvia, Cauca	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.
84	Sonson	18,5	Sonson, Antioquia	Empresas Públicas de Medellín E.S.P.
85	Sueva 2	6	Junin, Cundinamarca	EMGESA S.A E.S.P
86	Tequendama	19,4	San Antonio de Tena, Cundinamarca	EMGESA S.A E.S.P
87	Unión	0,7	Bohemia, Quindío	Empresa Multipropósito de Calarcá S.A. E.S.P.
88	Urrao	1,03	Urrao, Antioquia	ENERVÍA S.A. E.S.P.
89	Ventana A	2,5	Chicoral, Tolima	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.
90	Ventana B	2,5	Chicoral, Tolima	Compañía de Generación del Cauca S.A. E.S.P.

Grandes Presas

En Colombia existen aproximadamente 40 grandes presas. En el Cuadro 1-2 se presenta un consolidado de las grandes presas existentes en Colombia, según su material y tipo de presa y en el Anexo 1 se presenta una matriz con un mayor desglose de información de las mismas.

Cuadro 1-2. Grandes Presas existentes en Colombia

ID	Presas	Año	Localización Municipio / Departamento	Tipo
PRESAS DE CONCRETO				
1	Central Hidroeléctrica Bajo Anchicayá	1955	Dagua / Valle del Cauca	De arco y gravedad
2	Tenche	1962	Carolina del Príncipe / Antioquia	De arco y gravedad
3	Central Hidroeléctrica Calderas	1987	Granada y San Carlos / Antioquia	Gravedad
4	Represa del Sisga	1951	Chocontá / Cundinamarca	Gravedad
PRESAS EN CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO - CCR				
5	Central Hidroeléctrica de Betania	1981	Yaguará, Hobo, Campoalegre y Gigante / Huila	Gravedad
6	Presas Patángoras - Embalse Amaní - Central Hidroeléctrica Miel I	2002	Norcasia / Antioquia	Gravedad
PRESAS EN ENROCADO CON CARA DE CONCRETO				
7	Central Hidroeléctrica Alto Anchicayá	1974	Buenaventura - Dagua / Valle del Cauca	Gravedad
8	Embalse Sara Brut (Guacas)	2002	Bolívar / Valle del Cauca	Gravedad
9	Porce III	2010	Amalfí - Anorí / Antioquia	Gravedad
10	Presas de Golillas - Embalse de Chuza	1982	Chingaza - Fúquene / Cundinamarca	Gravedad
11	Presas Salvajina - Proyecto de regulación del río Cauca	1984	Suárez / Cauca	Gravedad
PRESAS EN ENROCADO CON NÚCLEO IMPERMEABLE				
12	Embalse Chisacá	1950	Usme D.C. / Cundinamarca	Gravedad
13	Embalse de La Copa	1990	Toca / Boyacá	Gravedad
14	Embalse el Hato	1992	Carmen de Carupa / Cundinamarca	Gravedad
15	La Esmeralda - Embalse de Chivor	1975	Santa María / Boyacá	Gravedad
16	Presas Cantarrana - Embalse Tunjuelo	2007	Bogotá / Cundinamarca	Gravedad
17	Presas Chingaza - embalse río La Playa y Frío		Cundinamarca	Gravedad
18	Presas Guavio - embalse Guavio, Batatas y Chivor	1990	Guasca, Gacheta, Ubalá y Gachalá / Cundinamarca	Gravedad
19	Presas San Rafael - embalse excedentes Acueducto Chingaza	1994	La Calera / Cundinamarca	Gravedad
PRESAS MIXTAS: CCR - TIERRA				
20	Porce II	2001	Amalfí - Gómez Plata / Antioquia	Gravedad
PRESAS EN TIERRA				
21	Embalse del Guájaro	1965	Repelón, Luruaco, Manatí y Sabanalarga / Atlántico	Gravedad
22	Embalse del Muña	1948	Sibaté / Cundinamarca	Gravedad
23	Embalse del Neusa	1952	Cogua - Tausa / Cundinamarca	Gravedad
24	Embalse La Fe	1973	El Retiro / Antioquia	Gravedad
25	Embalse La Regadera	1934	Usme D.C. / Cundinamarca	Gravedad
26	Embalse Playas	1987	San Rafael / Antioquia	Gravedad
27	Miraflores	1965	Carolina del Príncipe / Antioquia	Gravedad
28	Piedras Blancas	1952	Guarne / Antioquia	Gravedad
29	Presas El Buey - embalse La Fe	1983	La Ceja / Antioquia	Gravedad - Hidráulica de pasada

Cuadro 1-2. Grandes Presas existentes en Colombia (continuación)

ID	Presas	Año	Localización Municipio / Departamento	Tipo
30	Presas Guillermo Cano - Central Hidroeléctrica de Jaguas	1987	San Rafael, San Roque, Alejandría, Concepción y Santo Domingo / Antioquia	Gravedad
31	Presas Punchiná - Central Hidroeléctrica San Carlos	1983	San Carlos / Antioquia	Gravedad
32	Presas Santa Rita - embalse Peñol-Guatapé	1976	Guatapé / Antioquia	Gravedad
33	Quebradona o Riogrande I	1958	Santa Rosa de Osos / Antioquia	Gravedad
34	Riogrande II	1988	Donmatías / Antioquia	Gravedad
35	Troneras	1962	Carolina del Príncipe - Gómez Plata / Antioquia	Gravedad
PRESAS EN TIERRA CON NÚCLEO IMPERMEABLE				
36	Central Hidroeléctrica Calima	1966	Calima-Darién / Valle del Cauca	Gravedad
37	Central Hidroeléctrica de Rio Prado	1971	Prado / Tolima	Gravedad
38	Presas Sesquilé - Embalse de Tominé	1962	Sesquilé - Guatavita - Guasca / Cundinamarca	Gravedad
39	Represa Urrá I	1997	Tierralta / Córdoba	Gravedad
40	Central Hidroeléctrica Charquito (Canoas)	1897	Soacha / Cundinamarca	Gravedad - Hidráulica de pasada

En su mayoría, las grandes presas en Colombia están construidas en tierra y su principal uso es el de generación de energía. A diferencia de las pequeñas presas, éstas por lo general presentan un embalse asociado, lo que puede ocasionar mayores consecuencias ante un evento de falla o rotura que es el tema que abarca el presente trabajo y supone el rompimiento mismo de la presa para el análisis de las consecuencias ambientales.

2 NORMATIVIDAD ASOCIADA A RIESGOS EN COLOMBIA

La falla o rotura de presa puede ocasionar un desastre, definido en la Ley 1523 de 2012¹ como el resultado que se desencadena de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos no intencionales que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales, causa daños o pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales.

Varias entidades estudian el análisis de riesgos de la siguiente manera:

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT (2006), a través de los Términos de referencia para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental de Centrales Hidroeléctricas (HE-TER-1-01) y los Términos de referencia para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental de presas, represas o embalses (PR-TER-1-01) (MAVDT (2006)), complementados con la Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales (MAVDT (2010)), necesarios para la obtención de la Licencia Ambiental de este tipo de proyectos, incluyen dentro del contenido que deben llevar los documentos, la elaboración de un análisis de riesgos y del diseño de un plan de contingencias, para este caso aplicable a un evento de falla o rotura de presa.

El Banco Mundial, en el análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia, analiza las causas y la medición de su crecimiento. Se profundiza sobre los avances institucionales en el manejo del riesgo en los diferentes niveles de gobierno y la forma como el tema se ha incorporado en la administración pública territorial y sectorial. Señala además, grandes oportunidades para articular la gestión del riesgo de desastres en los instrumentos de planificación, inversión, seguimiento y control existentes, y muestra la necesidad de definir responsables tanto públicos como privados como parte de la estrategia de reducción de la vulnerabilidad fiscal del Estado (Banco Mundial, 2012).

También existen normas técnicas que pueden ser empleadas en el análisis y evaluación del riesgo, como las expedidas por el ICONTEC (NTC – ISO 31000, NTC 5254; Véase Cuadro 2-1), que si bien están enfocadas hacia la administración pública, incluyen definiciones y pasos a seguir para su evaluación, que ayudan a establecer las consecuencias. Otras normas, manuales o guías más específicas, que pueden dar directrices para un adecuado abordaje de la evaluación del riesgo, son las que tratan sobre sismos, análisis o cálculos de crecientes, fenómenos de remoción en masa, etc., algunas de carácter nacional y otras que han sido expedidas por autoridades de competencia regional como las Corporaciones Autónomas Regionales (Cuadro 2-1).

¹ 1523 de 2012 “Por el cual se adopta la Política Nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones”

La Dirección de Desarrollo Territorial del MAVDT, con el apoyo del Departamento Nacional de Planeación a través del Programa para la Reducción de la Vulnerabilidad Fiscal del Estado ante Desastres Naturales, elaboró una guía metodológica (entre otros instrumentos) dirigida a fortalecer los procesos de Ordenamiento Territorial y de Desarrollo Regional en el país, y tiene por objetivo dar a conocer a los funcionarios, instituciones y comunidad en general las herramientas básicas para incorporar de forma técnica y adecuada, la Prevención y Reducción de Riesgos en los procesos de Ordenamiento Territorial, Planes de Desarrollo y de Planificación Regional y Sectorial (MAVDT (2005)). En estos trabajos, al igual que en la Ley 1523 de 2012, se realizan definiciones y se indican algunas formas de abordar las temáticas relacionadas con el riesgo, vulnerabilidad, amenaza, desastre, prevención o mitigación, entre otras, obviamente con un enfoque administrativo y más dirigido a desastres naturales, aun cuando se involucran aspectos a desastres de origen antrópico.

En Colombia, en los últimos 15 años se ha promulgado normatividad relacionada con la gestión del riesgo de desastres. En el país se han presentado grandes pérdidas sufridas por la ocurrencia del fenómeno de La Niña 2010 – 2011 y desde 1999, el gobierno colombiano ha mantenido una agenda en materia de gestión del riesgo de desastres con el Banco Mundial (Banco Mundial, 2012). Dentro del Plan Nacional de Desarrollo – PND, se abordan aspectos sobre la prevención de desastres, incluyendo así en 2003 la directriz de elaborar un Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres. En 2007, se incluye la visión de realizar una gestión ambiental y del riesgo que promueva el desarrollo sostenible, en la que además, se direcciona a que se fortalezcan las políticas públicas para la gestión del riesgo, orientándolas no solo a la atención, sino prioritariamente a la prevención. Ya para el 2011, el PND contempla el tema de la reducción de la vulnerabilidad fiscal del estado frente a desastres.

En el Cuadro 2-1 se presenta una compilación del marco legal colombiano asociado a la gestión del riesgo, planes de contingencia o a atención de desastres, resaltando los aspectos normativos de mayor aplicabilidad a eventos de falla o rotura de una presa. En el artículo 42 de la Ley 1523 de 2012, se especifica que todas las entidades públicas o privadas que brinden la prestación de servicios públicos cuyas obras civiles mayores puedan significar riesgo de desastre para la sociedad, así como las que específicamente determine la Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, deberán realizar un análisis de que considere los posibles efectos de eventos naturales sobre la infraestructura expuesta y aquellos que se deriven de los daños de la misma en su área de influencia, así como los que se deriven de su operación. Con base en este análisis diseñará e implementará las medidas de reducción del riesgo y planes de emergencia y contingencia que serán de su obligatorio cumplimiento.

Aun cuando puede considerarse que ya se incorpora el análisis y gestión del riesgo en Colombia, aún se tiene un enfoque general y al adentrarse en las metodologías que permitan definir consecuencias, principalmente en el componente ambiental, solamente se evidencian lineamientos (tema que se aborda en el presente trabajo de grado, el cual parte de la premisa de un rompimiento de la presa). En el caso específico de las consecuencias ambientales por falla o rotura de presa, no se

evidencia en la normatividad requerimientos puntuales, su manejo o análisis particular, razón por la cual, siguen habiendo vacíos normativos que permitan orientar un análisis responsable y holístico ante este riesgo potencial.

Cuadro 2-1. Normatividad asociada a la gestión del riesgo, planes de contingencia o a atención de desastres

NORMA	OBJETO DE LA NORMA Y DESCRIPCIÓN ARTICULOS
<p>Ley 1575 de 2012</p>	<p>“Por medio de la cual se establece la Ley General de Bomberos de Colombia”. Art. 1. Responsabilidad Compartida. La gestión integral del riesgo contra incendio, los preparativos y atención de rescates en todas sus modalidades y la atención de incidentes con materiales peligrosos es responsabilidad de todas las autoridades y de los habitantes del territorio colombiano, en especial, los municipios, o quien haga sus veces, los departamentos y la Nación. Esto sin perjuicio de las atribuciones de las demás entidades que conforman el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.</p> <p>En cumplimiento de esta responsabilidad los organismos públicos y privados deberán contemplar la contingencia de este riesgo en los bienes muebles e inmuebles tales como parques naturales, construcciones, programas de desarrollo urbanístico e instalaciones y adelantar planes, programas y proyectos tendientes a disminuir su vulnerabilidad.</p>
<p>Ley 1523 de 2012</p>	<p>“Por el cual se adopta la Política Nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones”.</p>
<p>Ley 1450 de 2011</p>	<p>Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014. Capítulo 5. Sostenibilidad Ambiental y Prevención del Riesgo.</p> <p>Art 220. Reducción de la vulnerabilidad fiscal del estado frente a desastres. El Ministerio de Hacienda y Crédito Público diseñará una estrategia para el aseguramiento ante riesgos de desastres de origen natural y/o antrópico no intencional. Dicha estrategia estará orientada a la reducción de la vulnerabilidad fiscal del Estado.</p> <p>Parágrafo. El Ministerio de Hacienda y Crédito Público podrá, con cargo a los recursos del Presupuesto General de la Nación gestionar, adquirir y/o celebrar con entidades nacionales y/o extranjeras los instrumentos y/o contratos que permitan el aseguramiento y/o cubrimiento de dichos eventos.</p>
<p>Departamento administrativo de la función pública, 2011.</p>	<p>Guía para la administración del riesgo. Enfocada a la administración pública, establece definiciones y procedimientos para la evaluación del riesgo.</p>
<p>NTC – ISO 31000 expedida por el ICONTEC 2011.</p>	<p>Norma Técnica Colombiana para la gestión del riesgo, principios y directrices. Enfocada a la administración pública, establece definiciones y procedimientos para la evaluación del riesgo.</p>
<p>Decreto 2820 de 2010</p>	<p>"Por la Cual se reglamenta el Titulo VIII de la Ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales"</p>
<p>Resolución 1503 de 2010 MAVDT</p>	<p>“Por medio de la cual se adopta la Metodología General para la presentación de Estudios Ambientales y se toman otras determinaciones”.</p>

Cuadro 2-1. Normatividad asociada a la gestión del riesgo, planes de contingencia o a atención de desastres (continuación)

NORMA	OBJETO DE LA NORMA Y DESCRIPCIÓN ARTICULOS
<p>Ley 1151 de 2007</p>	<p>“Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010”. Capítulo 5. Gestión ambiental y del riesgo que promueva el desarrollo sostenible.</p> <p>5.1 Una gestión ambiental que promueva el desarrollo sostenible: El proceso de desarrollo de Colombia deberá sustentarse en una articulación adecuada de las dimensiones económica, social y ambiental, que permita sentar las bases para avanzar hacia el desarrollo sostenible. Esto exige la integración de consideraciones ambientales en los procesos de planificación del desarrollo, de manera que se promuevan modalidades sostenibles de producción y consumo, se prevenga la degradación ambiental y sus costos y se aseguren oportunidades de desarrollo a las generaciones futuras.</p> <p>Para ello, la gestión de los actores públicos y privados del Sistema Nacional Ambiental (SINA) se orientará al desarrollo de las siguientes estrategias:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Planificación ambiental en la gestión territorial, incorporando los determinantes ambientales y culturales en las decisiones de uso y ocupación del territorio, e incorporando y manejando el riesgo de origen natural y antrópico en los procesos de ordenamiento. <p>5.2 Gestión del riesgo para la prevención y atención de desastres: El aumento de las condiciones de vulnerabilidad ante ciertas amenazas, exacerbadas en la mayoría de los casos por la degradación ambiental, que se manifiesta en escenarios de desastre, es una ratificación más de la necesidad de integrar la gestión ambiental y del riesgo, a la planificación de diferentes sectores de la economía. De esta manera, esta gestión integrada se constituye en una herramienta estratégica para la promoción del desarrollo sostenible. Bajo este escenario, se fortalecerán las políticas públicas para la gestión del riesgo, orientándolas no solo a la atención, sino prioritariamente a la prevención, con los siguientes objetivos: i) Aumentar el conocimiento, monitoreo, análisis y evaluación de las amenazas, la vulnerabilidad y el riesgo; ii) Mejorar la información sobre el riesgo y su divulgación; iii) Incrementar las medidas para la prevención y mitigación del riesgo; iv) Fortalecer institucionalmente el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (SNPAD); y v) Aumentar la capacidad de respuesta financiera, no solo ante la ocurrencia de un evento adverso, sino en acciones de prevención; vi) En los territorios indígenas serán las autoridades tradicionales parte fundamental en el Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres.</p> <p>De manera particular, como parte de las medidas para la prevención y mitigación del riesgo, se contempla:</p> <ul style="list-style-type: none"> i) Incorporar la gestión del riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial; ii) Formular estrategias para incluir esta temática en instrumentos de planificación sectorial y territorial; iii) Elaborar lineamientos de política para el mejoramiento integral de asentamientos en zonas de riesgo mitigable y el reasentamiento de población en zonas de riesgo no mitigable; y iv) Fomentar la implementación de planes municipales de gestión del riesgo y planes de contingencia para infraestructura indispensable.
<p>Resolución 1280 de 2006 MAVDT</p>	<p>“Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental para la construcción y operación de centrales hidroeléctricas generadoras”.</p>
<p>Resolución 1284 de 2006 MAVDT</p>	<p>“Términos de referencia para la elaboración del E.I.A., para la construcción de presas, represas o embalses con capacidad mayor de 200 millones de metros cúbicos de agua”.</p>

Cuadro 2-1. Normatividad asociada a la gestión del riesgo, planes de contingencia o a atención de desastres (continuación)

NORMA	OBJETO DE LA NORMA Y DESCRIPCIÓN ARTICULOS
Decreto 423 de 2006 (Alcaldía Mayor de Bogotá)	<p>Por el Cual se adopta el Plan Distrital para la Prevención y Atención de Emergencias para Bogotá D.C.</p> <p>Art.18 Los Planes de Emergencias son instrumentos para la coordinación general y actuación frente a situaciones de calamidad, desastre o emergencia. Define las funciones si actividades, responsables, procedimientos, organización y recursos aplicables para la atención de emergencias independientemente de su origen y naturaleza.</p> <p>Art. 19 Los Planes de Contingencia son instrumentos complementarios a los planes de emergencia, que proveen información específica para la atención de desastres o emergencias derivadas de un riesgo o territorio en particular.</p>
Resolución 000356 de 2005 - CDMB	<p>Normas Técnicas para el Control de Erosión y para la Realización de Estudios Geológicos Geotécnicos e Hidrológicos.</p> <p>Compendio de normas técnicas y procedimientos para el control de la erosión, para la realización de estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos y la ejecución de proyectos de desarrollo en el área de influencia de la entidad.</p>
NTC 5254 (ICONTEC). 2004.	<p>Norma Técnica Colombiana para la gestión del riesgo. Enfocada a la administración pública, establece definiciones y procedimientos para la evaluación del riesgo.</p>
Ley 812 de 2003	<p>"Plan Nacional de desarrollo 2003-2006: Hacia un estado comunitarios"</p> <p>Título II: Plan de Inversiones Públicas, Capítulo II: Descripción de los principales programas de inversión, Literal c: Construir equidad social, Ordinal 8: Prevención y Mitigación de Riesgos Naturales</p> <p>Art. 3 La Oficina Nacional para la Atención de Desastres, elaborará un Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, el cual, una vez aprobado por el Comité Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, será adoptado mediante decreto del Gobierno Nacional.</p> <p>Art.13 El Comité Técnico Nacional y los Comités Regionales y locales para la Prevención y Atención de Desastres, según el caso, elaboraran, con base en los análisis de vulnerabilidad, planes de contingencia, para facilitar la prevención o para atender adecuada y oportunamente los desastres probables.</p> <p>Art. 14 Aspectos Sanitarios de los Planes de Contingencia. El Ministerio de Salud coordinara los programas de entrenamiento y capacitación para planes de contingencia en los aspectos de orden sanitaria, o bajo la vigilancia y control del Comité Técnico Nacional.</p>
Ley 715 de 2001	<p>"Se establece a los municipios la función de prevenir y atender los desastres en su jurisdicción, adecuar las áreas urbanas y rurales en zonas de alto riesgo y reubicación de asentamientos".</p>
Directiva Presidencial No 005 de 2001	<p>Establece la "Actuación de los distintos niveles de gobierno frente a desastres súbitos de Carácter Nacional"</p>
CONPES 3146 de 2001	<p>Aprueba la estrategia para consolidar la ejecución del Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, PNDA, en corto y mediano plazo.</p>
Decreto 321 de 1999	<p>"Por el Cual se adopta el Plan Nacional de Contingencias contra derrames de hidrocarburos, derivado y sustancias Nocivas en aguas marinas, fluviales y Lacustres".</p>
Decreto 879 de 1998	<p>"Por el cual se reglamenta parcialmente la Ley 388/97" - Señala que las áreas de amenazas y riesgos deben ser identificadas, delimitadas, adelantar acciones para evitar la localización de actividades o asentamientos humanos en dichas zonas, reubicarlos según el caso, establecimiento de restricciones y sanciones por su localización indebida, y la aplicación de acciones de manejo, recuperación y prevención.</p>
Decreto 093 de 1998	<p>"Por el cual se adopta el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres". Contiene elementos fundamentales de la legislación Colombiana sobre Planes de Contingencia y atención de desastres y emergencias</p>

Cuadro 2-1. Normatividad asociada a la gestión del riesgo, planes de contingencia o a atención de desastres (continuación)

NORMA	OBJETO DE LA NORMA Y DESCRIPCIÓN ARTICULOS
Decreto 33 de 1998	"Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo resistente NSR-98"
Ley 400 de 1997	"Por el cual se adoptan normas sobre construcciones sismo resistentes"
Ley 388 de 1997	"Ley de Ordenamiento Territorial" - Establece los criterios para el ordenamiento territorial, la reglamentación del uso de los suelos y la ocupación del espacio según su potencialidad, para incluirlos en los planes de desarrollo territorial de los departamentos, municipios y distritos.
Decreto 2340 de 1997	"Por el cual se dictan unas medidas para la organización en materia de prevención y mitigación en incendios forestales y se dictan otras disposiciones"
Decreto 2190 de 1995	"Por la Cual se ordena la elaboración y desarrollo del Plan Nacional de Contingencias contra derrames de hidrocarburos, derivados y sustancias nocivas en aguas marinas, fluviales y lacustres".
Decreto 969 de 1995	"Por la Cual se organiza y reglamenta la Red nacional de Centros de reserva para la Atención de Emergencias"
Resolución 7550 de 1994	Por las Cuales se regulan las actuaciones del sistema educativo Nacional en la prevención de emergencias y desastres. Art 3. Solicitar a los establecimientos educativos, la creación y desarrollo de un proyecto de prevención y atención de emergencias y desastres, de acuerdo con los lineamientos emanados por el Ministerio de Educación Nacional, el cual hará parte Integral del proyecto educativo institucional.
Ley 99 de 1993	"Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la conservación y protección del medio ambiente y los recursos naturales y se organiza el Sistema Nacional Ambiental SINA". Art. 1 Numeral 9: La prevención y Atención de desastres es materia de interés colectivo, y las medidas tomadas para evitar o mitigar los efectos de su ocurrencia serán de obligatorio cumplimiento.
Constitución Política de Colombia de 1991	Art. 215. Cuando sobrevengan hechos que perturben o amenacen con perturbar en forma grave o inminente el orden económico, social y ecológico del país, o que constituyan grave calamidad pública, podrá el presidente con la firma de los ministros declarar el estado de emergencia. Mediante declaración que deberá ser motivada, podrá el presidente dictar decretos con fuerza de ley destinada a conjurar la crisis y a impedir la extensión de sus efectos".
Directiva Presidencial No 33 de 1991	Donde se establece la responsabilidad de los organismos y entidades descentralizadas de orden nacional y público, en el desarrollo y operación del Sistema Nacional para la prevención y atención de desastres.
Decreto 1547 de 1984	Por la Cual se Crea el Fondo Nacional de Calamidades
Ley 9 de 1979	Código Sanitario Nacional. "Por la cual se dictan Medidas Sanitarias". Art. 501 Cada Comité para atender emergencias, deberá elaborar un plan de contingencias para su respectiva jurisdicción con los resultados obtenidos en los análisis de vulnerabilidad. Además deberán considerarse los diferentes tipos de desastres que pueden presentarse en la comunidad respectiva. El comité Nacional de emergencias elaborará, para aprobación del Ministerio de Salud un modelo con instituciones que aparecerán en los planes de contingencias. Art. 502 El Ministerio de salud coordinará los programas de entretenimiento y capacitación para planes de contingencia en los aspectos sanitarios vinculados a urgencias o desastres. Parágrafo. El Comité Nacional de Emergencias, deberá vigilar y controlar las labores de capacitación y de entrenamiento que se realicen para el correcto funcionamiento de los planes de contingencias.
Decreto Ley 2811 de 1974	Código Nacional de los recursos Naturales y la protección del Medio Ambiente

3 CASOS DE FALLA O ROTURA DE PRESA EN EL MUNDO

Los principales acontecimientos de falla o rotura de presa a nivel mundial se describen resumidamente a continuación:

PRESA PANTANO DE PUENTES



Fuente: Jean Laurent.

Ubicada en Lorca España, en 1802 presentó rotura como consecuencia de una posible construcción defectuosa. Se registraron más de 600 muertos.

El motivo por el que se produjo la rotura del pantano de Puentes fue el sifonamiento producido por el defectuoso sistema de cimentación. En ningún caso era apropiado el pilotaje, teniendo en cuenta su altura y el material, completamente permeable,

atravesado por los pilotes. La tragedia de Puentes ocasionó que se creara un centro de formación especializada en ingeniería para dotar de conocimientos suficientes a los profesionales que tuvieran que proyectar infraestructuras importantes (Digital, 2011).

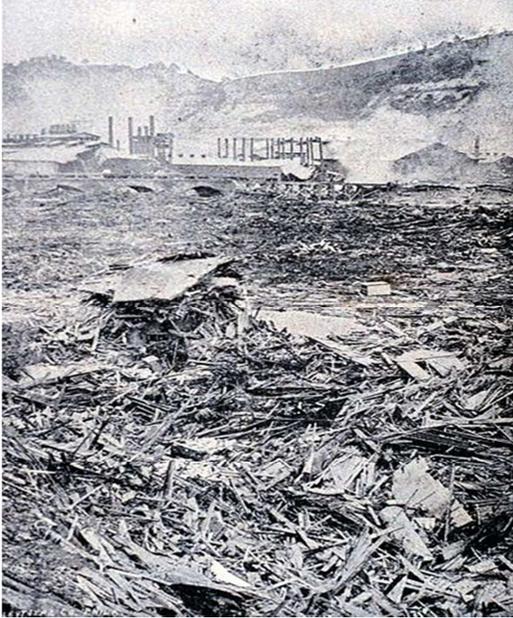
PRESA DALE DIKE



Fuente: The History of the City of Sheffield.

En 1864, esta presa ubicada en South Yorkshire, Reino Unido, sufrió un fallo posiblemente por una construcción defectuosa, con un pequeño escape en el paramento. Ocasiónó 244 muertos y daños masivos aguas abajo (Loxley, Don y el centro de Sheffield) (Chanson, 2009).

PRESA SOUTH FORK



Fuente: Archival Photograph by Mr. Steve Nicklas.

Localizada en Johnstown, Pennsylvania, Estados Unidos, fue afectada en 1889 por un mantenimiento pobre; los tribunales lo consideraron un caso fortuito acrecentado por la excepcional lluvia torrencial (Chanson, 2009).

PRESA WALNUT GROVE



Fuente: www3.gendisasters.com

En 1890, esta presa ubicada en Wickenburg, Arizona Estados Unidos, por causa de fuertes nevadas y lluvias, presentó la rotura (Chanson, 2009).

PRESA DESNÁ

Defectos en la construcción provocaron la rotura de esta presa en 1916, localizada en Desná, Imperio austrohúngaro (Chanson, 2009).

PRESA LOWER OTAY



Fuente: Rafay Farooq.

Localizada en California – Estados Unidos, esta presa en 1916 después de una temporada de fuertes lluvias, la presa fue sobrepasada y comenzó a descargar agua.

Lamentablemente no se tomaron las medidas de rescate apropiadas y el depósito vaciado ocasionó grandes daños en las zonas cercanas y la muerte de 40 personas (Chanson, 2009).

PRESA GLENO



Fuente: Rafay Farooq.

Esta presa ubicada en Bérghamo – Italia fue planeada inicialmente para ser una presa de gravedad, pero más tarde, debido a problemas financieros se hizo como una presa de múltiples arcos. Debido a las malas metodologías de construcción, los arcos eran más débiles de lo que deberían haber sido.

También se ha considerado que los cimientos de la presa se hicieron del mismo material débil. El 1º de diciembre de 1923, la presa colapsó derramando más de 4,5 Mm³ de agua en las zonas de los alrededores, que fueron completamente arrasadas. El total de víctimas fatales fue de 356 (Farooq, 2013).

PRESA LLYN EIGIAU

La avenida ocasionada por la rotura de esta presa, localizada en Dolgarrog, North Wales Reino Unido, también destruyó la presa Coedty en 1925. El contratista culpó a la reducción de costos pero también se considera como causa, las fuertes precipitaciones, ya que cayeron 630 mm de agua en 5 días (Chanson, 2009).



Fuente: news.bbc.co.uk

PRESA ST. FRANCIS

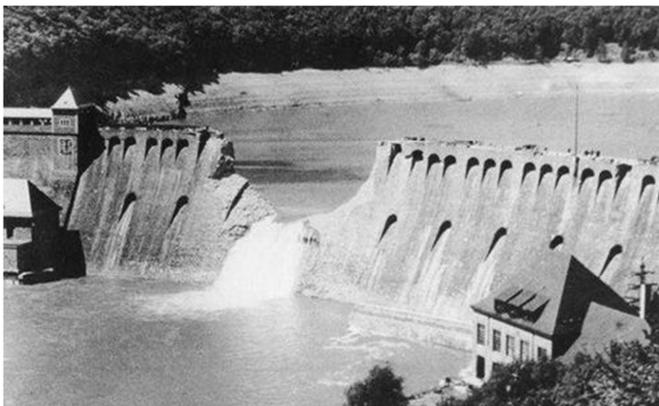


Fuente: Santa Clarita Valley Historical Society

Localizada en California, Los Ángeles Estados Unidos, esta presa de concreto falló en 1928, se dice que por inestabilidad geológica del cañón que pudo haber sido detectada con tecnología disponible en aquel tiempo, combinado con un error humano que evaluó el desarrollo de las grietas como "normal" para una presa de este tipo. Debido a que casi la totalidad de la

presa fue arrastrada en el momento del evento, la misma no fue reconstruida. La cifra oficial de muertos en agosto 1928 fue de 385. En respuesta a la catástrofe, se creó un programa de seguridad de la presa en 1929 (S.A., St. Francis Dam disaster. Office of Historical Preservation, California State Parks, 2013).

PRESA EDERSEE



Fuente: Rafay Farooq

Fue construida sobre el río Eder en el norte de Hesse, Alemania. El 17 de mayo 1943 fue bombardeada por los británicos en la Segunda Guerra Mundial. Las bombas destruyeron por completo la estructura de la presa y en pocos minutos todo el reservorio quedo vaciado, el agua que fluyó por las zonas cercanas causó graves daños estructurales y un total de 100 víctimas (Farooq, 2013).

PRESA VEGA DE TERA



Fuente: Raiden.

En 1959, esta presa localizada en Ribadelago, España produjo la muerte de 144 personas, cuando un sector de más de 150 metros de longitud del muro de contención de la presa se derrumbó dejando escapar casi 8 millones de metros cúbicos del agua embalsada.

El pueblo, situado ocho kilómetros río abajo, fue rápidamente alcanzado y

muchas de las edificaciones fueron destruidas por el agua. Se aduce la causa a problemas de la construcción. A raíz de esto la normativa española de presas cambió de forma importante (Lera, 1999).

PRESA MALPASSET



Fuente: ProfessorX

Malpasset fue una presa de arco del río Reyran, ubicada en la Costa Azul, en el sur de Francia. Se derrumbó el 2 de diciembre de 1959, ocasionando la muerte de 421 personas y destruyó dos pequeñas aldeas: Malpasset y Bozon. En las inundaciones resultantes; varias pequeñas carreteras y vías férreas quedaron destruidas también, fluyendo el agua por la mitad occidental de Fréjus y finalmente llegó

al mar. Los daños ascendieron a 68 millones de dólares.

Una falla tectónica es la principal hipótesis de las causas potenciales de la ruptura de la pared. También se considera que las explosiones durante la construcción de la carretera podrían haber causado el desplazamiento de la roca base de la presa (Bellier, 1967).

PRESA PANSHET



Fuente: onedaypicnic.co.in

Esta presa, localizada en Maharashtra India, sufrió rotura en el año 1961. La presa, de 61 m de altura, se encontraba en construcción cuando los monzones llegaron y las compuertas de los desagües no estaban completamente instaladas y funcionales (Chanson, 2009).

BALDWIN HILLS RESERVOIR



Fuente: Dept water reesources

En 1963, esta presa ubicada en Los Ángeles California, Estados Unidos, presentó una subsidencia causada por una sobreexplotación de un yacimiento petrolífero. En el proceso, 277 casas fueron destruidas y 5 personas perdieron la vida (Chanson, 2009).

PRESA DE VAJONT

Estrictamente la presa no fallo, pero sí fallaron las laderas del vaso que al caer sobre el agua generaron un megatsunami que generó una onda que pasó por encima de la presa. Era una de las presas más altas del mundo, localizada en Vajont, Italia, con 262 metros de altura, 27 metros de grosor en la base y 3,4 metros en la cima. El evento ocurrió en 1963. Cincuenta millones de metros cúbicos de agua sobrepasaron la presa en una ola de 90 metros de altura. A pesar de eso, la estructura de la presa no recibió daños importantes. Sin embargo, el megatsunami, consecuencia del deslizamiento, destruyó totalmente el pueblo de Longarone y las pequeñas villas de Pirago, Rivalta, Villanova y Faè, matando a unas 1.450 personas (Vajont, 1963).



Antes (izq.) y después (der.) de la catástrofe.
Fuente: Bepi Zanfron.

PRESA FONTENELLE



Esta presa de tierra zonificada se encuentra ubicada en Estados Unidos, tiene una altura de 42 m y se determinó como causa del fallo en 1968, que los desagües no se habían terminado de construir cuando se estaba llenando la presa (Chanson, 2009).

Fuente: es.touristlink.com

PRESA #3 DE BUFFALO CREEK



En 1972, esta presa ubicada en West Virginia, Estados Unidos, falló hipotéticamente por una inestabilidad provocada por una mina de carbón. De una población de 5.000 personas, 125 personas murieron, 1.121 resultaron heridas y más de 4.000 personas quedaron sin hogar. 507 casas fueron destruidas, además de cuarenta y cuatro casas móviles y 30 empresas (Robinson, 2013).

Fuente: Rafay Farooq

PRESA CANYON LAKE

Localizada en Dakota del Sur, E.E.U.U., esta presa de tierra de 6 m de altura sufrió en 1972 rebose debido a que el aliviadero se encontraba obstruido por detritos, ocasionando 237 muertos (Chanson, 2009).

PRESAS BANQIAO Y SHIMANTAN



Fuente: depletedcranium.com

Localizadas en China, estas presas en 1975 fallaron por causa de lluvias extremas, muy superiores a las de diseño, según análisis del evento (Tifón Nina). Las inundaciones resultantes ocasionaron la pérdida de vida de al menos a 171.000 personas. Además, la creación de lagos temporales en unos 12.000 km², siete cabeceras municipales inundadas, al igual que miles de kilómetros cuadrados de campos y 11 millones de habitantes afectados (Osnos, 2011).

PRESA TETON



Fuente: David Rogers

Esta presa de tierra zonificada de 93 m de altura, localizada en Idaho E.E.U.U presentó en 1976 erosión del suelo subyacente, asentamiento del suelo y filtración.

Las filtraciones por debajo de la presa se detectaron por primera vez el 3 de junio de 1976, pero no fueron consideradas causa de alarma. No obstante, según indican reportes

del estudio realizado posteriormente, iniciadas las 7 de la mañana del 5 de junio el personal de la presa detectó filtraciones en ambos estribos de roca en la orilla norte del río en la base de la presa y alrededor de 30,48 m desde el tope de la presa.

Estas filtraciones empeoraron y a la mitad de la mañana, momento en el que se advirtió que la presa podría fallar. El resultado fue la inundación de las ciudades de Sugar y Reburg, pérdida de 14 vidas, directa e indirectamente y con un costo estimado de cerca de 1 billón de dólares.

Dentro de las hipótesis que se han desarrollado para explicar el rompimiento de esta presa se tiene que la presa falló porque la pantalla era inadecuada, pues era permeable; no había filtros en el rastrillo y el núcleo era poco plástico. Otra hipótesis sostiene que la falla de la presa se dio porque se generaron tensiones verticales aproximadamente iguales al 60% del peso de tierras (según cálculos por M.E.F.); se presentó una fractura hidráulica que unida a la falta de filtros en el rastrillo y al núcleo poco plástico, generó el rompimiento de la presa.

Como medida post-rotura, se realizó la inclusión del sistema de drenaje a la hora de diseñar una presa de tierra, endurecimiento de las normativas de cálculo y diseño de presas en Estados Unidos (Bolton, 2011).

PRESA EUCLIDES DA CUNHA

Esta presa de tierra, de 63 m de altura, se encuentra localizada en Brasil y en el año 1977, por causa de un mal protocolo de funcionamiento, el operador no abrió completamente las compuertas del aliviadero (Chanson, 2009).

PRESA KELLY BARNES



Fuente: Vernon B. Sauer

En 1977, esta presa de tierra de 12 m de altura, localizada en Georgia, Estados Unidos, colapsó y la inundación resultante mató a 39 personas y causó \$ 2.8 millones en daños y perjuicios. El reporte de los investigadores no arrojó una causa específica, ya que no tenían planes de ingeniería de la presa y los registros de la construcción de la presa se basaron en testimonios, fotografías y artículos de prensa, aunque

posteriormente se asumió un posible error de diseño debido a incrementos continuos de carga por aprovechamiento energético (Board, 1977).

PRESA MACHHU II



Fuente: www.thefloodbook.com

Presas también localizadas en la India, de 22 m de altura, de tipo mixto (tierra y una sección central de gravedad) rebose en 1979 aparentemente como consecuencia de una previsión incorrecta de avenida y diseño de aliviadero insuficiente y en el momento del rebose, se intentó en vano abrir las compuertas dejando más de 1100 muertos por causa del evento (Chanson, 2009).

PRESA LAWN LAKE



Fuente: Town of Estes Park

Localizada en Rocky Mountain National Park, Estados Unidos, esta presa falló en 1982. La repentina liberación de 849.000 m³ de agua dio lugar a una inundación que causó la muerte a tres personas que acampaban en el parque y causó \$ 31 millones en daños.

El Ingeniero del Estado de Colorado determinó que la causa probable de la falla de la presa

era el deterioro de plomo de calafateo en la unión entre el tubo de salida y la válvula de puerta que conduce a la erosión interna de la presa de tierra de relleno (Keller, 2004).

PRESA TOUS

Ubicada en la Provincia de Valencia, España, esta presa falló en 1982. De tipo mixta de escollera y arcilla, presentó el evento ante una descomunal crecida del río Júcar y no abrieron las compuertas de los aliviaderos por lo que el río fue derruyendo la presa que, finalmente, cedió por completo.



Fuente: EFE/Archivo

Dentro de los análisis que se hicieron del suceso, se identificó que la Instrucción de Grandes Presas establece la obligatoriedad de realizar estudios hidrográficos, climatológicos y geológicos, incluso en un periodo de recurrencia de quinientos años, que no constan efectuados en las actuaciones de la presa de Tous, en la fase de construcción ni, especialmente, en el momento de su

conservación y mantenimiento, reduciéndose el control diario a un rutinario seguimiento de los niveles de agua, sin la adopción de medidas específicas ante el previsible incremento de las crecidas por el aumento de los niveles racionales de pluviosidad, según se refleja en la sentencia.

La hipótesis sobre la razón por lo cual falló la presa fue negligencia de un aviso de lluvias fuertes en la zona y la ausencia de personal cualificado durante la noche en temporada de alerta roja (fallo de sentencia de la corte española). Sin embargo, nuevos estudios indicaron que el caudal de la riada que causó la rotura de la presa de Tous casi alcanzó los 9.000 metros cúbicos por segundo mientras que la capacidad de desagüe de las compuertas del embalse, que no pudieron ser abiertas, era de 7.000 metros cúbicos por segundo, superando el caudal.

Dentro de las medidas post-rotura, se generaron indemnizaciones y la reconstrucción de la presa. A nivel normativo, en España se contaba con la Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas de 1967 y a raíz de la rotura de la presa, se decidió impulsar la modificación de la Instrucción y el 12 de marzo de 1996 se aprobó el "Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses". Como consecuencia se registró una veintena de muertos, anegación de varios pueblos de la comarca de la Ribera y daños estructurales en edificios aguas abajo (Alcrudoa, 2007).

PRESA DE CARSINGTON

En 1984, esta presa localizada en Derbyshire, Inglaterra, colapsó parcialmente antes de su llenado, debido a lo que se dedujo como plastificación del núcleo arcilloso (Chanson, 2009).

PRESA DE VAL DI STAVA



Fuente: Italien wikipedia

El colapso de esta presa italiana ocurrió en 1985, como consecuencia de un mantenimiento pobre y escaso margen de seguridad en el diseño; los desagües de fondo fallaron elevando la presión de la presa. El resultado fue uno de los peores desastres de Italia, con la muerte de 268 personas, la destrucción de 63 edificios y la demolición de ocho puentes (ItalienWikipedia, 2013).

PRESA BELCI

Presa con núcleo arcilloso y espaldones de grava, de 18 m de altura, localizada en Rumania, presentó en 1991 un fallo en la apertura de las compuertas dejando 66 muertos dentro de las consecuencias del evento (Chanson, 2009).

PRESA OPUHA



Fuente: Orari Opihi Pareora Zone Committee

En 1997, después de tres días de lluvia continua en la cuenca superior, se dio lugar a la rotura de esta presa de Nueva Zelanda. Se presentaron daños extensos aguas abajo del sitio de construcción.

Para definir su reconstrucción, se presentaron demoras debido a un análisis ambiental. En investigaciones realizadas se estableció que poblaciones de insectos y peces fueron aniquiladas y que por el colapso podrían no recuperarse por completo

hasta que las inundaciones naturales limpiarán el río de arena y limo que estaban afectando además zonas de desove (Society, 1997).

PRESA SOBĚNOVSKÁ



Fuente: Karel Hudera

Esta presa de gravedad en enrocado, localizada en Soběnov - República Checa, sufrió una ruptura después de lluvias extremas durante las inundaciones de Europa en 2002 (Chanson, 2009).

PRESA ZAYZOUN



Fuente: BBC News. June 5. 2002

El 4 de junio de 2002 la presa Zayzoun, al norte de la ciudad de Hama, se derrumbó, causando graves daños a los pueblos de Mshik, Karkur, Kastun, Zayzoun y Ziyara, situado cerca de la presa, 90 kilómetros al noroeste de Hama. El hecho

ocurrió sin previo aviso; 22 personas perdieron la vida, 4.000 quedaron sin hogar y más de 8.000 hectáreas de tierras de cultivo fueron arrasadas.

Construida en 1995, la represa fue 43m alto ya cinco kilómetros de largo con una capacidad de almacenamiento de 70 millones de metros cúbicos. La brecha final fue de más de 60 metros de ancho a través del cual todo el almacenamiento pudo salir en un corto tiempo (Vogel, 2002).

PRESA BIG BAY



Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration

En 2004 falló esta presa de tierra localizada en Mississippi - Estados Unidos por causa de una filtración pre-existente.

La inundación afectó Bahía Creek y Baja Little Creek. Una evaluación de los daños indicaron que 27 casas fueron destruidas, 21 viviendas tuvo daños mayores, 20 casas tenían daños menores, 26 casas móviles fueron destruidas y 4 casas móviles tuvieron daños menores. En total, 104 estructuras fueron documentados como dañadas o destruidas. No se perdieron vidas humanas (MEMA, 2004).

PRESA DE CAMARÁ



Fuente: Geoengineer.org

Localizada en Paraíba – Brasil, esta presa sufrió ruptura después de fuertes lluvias el 17 de junio de 2004, inundando los pueblos de Alagoa Grande y Mulungu. Al menos tres personas murieron (Vogel, 2002).

PRESA DE SHAKIDOR

La presa de este pequeño embalse localizado en Pasni – Pakistán, falló en 2005 debido a las fuertes inundaciones causadas por el exceso de lluvias, lo que resultó en la muerte de alrededor de 70 habitantes (Usa Today, 2005).



Fuente: Rafay Farooq

PRESA Y EMBALSE DE TAUM SAUK

El 14 de diciembre de 2005, falló el terraplén de esta presa ubicada en Lesterville, Missouri - Estados Unidos, posiblemente por un error informático o del operador. Los manómetros no se tuvieron en cuenta a sabiendas de que existían registros de roturas con presiones menores (Vogel, 2002).



Fuente: US Geological Survey

PRESA DE CAMPOS NOVOS

Localizada en Campos Novos – Brasil, esta presa de concreto falló en 2006 después de un derrumbe en el túnel, el cual según estudios posteriores al evento, ya presentaba grietas previas al colapso (Environment News Service, 2006).



Fuente: Humberto Marengo

SITU GINTUNG



Fuente: BBC Indonesia

La presa localizada en Tangerang - Indonesia falló el 27 de marzo de 2009 durante lluvias monzónicas, posiblemente por un mantenimiento escaso y aparentemente debido a que la puerta que conduce al aliviadero era demasiado pequeña, drenando el lago, con inundaciones resultantes que ocasionaron la muerte de al menos 100 personas (webadmin, 2009).

CONSIDERACIONES

En revisión de los principales eventos de falla o rotura de presas a nivel mundial, se puede observar que se encuentran casos ocasionados por diferentes causas, tales como lluvias que superan los caudales de diseño, eventos naturales como tifones, negligencia durante la operación o en la construcción, falta de mantenimiento o problemas de orden público, entre otros.

Al revisar los análisis o declaraciones sobre las consecuencias del evento, se puede inferir que hay un énfasis en pérdida de vidas humanas, daños individuales o grupales y daños a infraestructura. Si bien estos análisis permiten mejorar las metodologías de cálculo y de respuesta ante estos casos, es evidente que no se incluyen los análisis de afectaciones ambientales (fisicobióticas) (Cuadro 3-1). Para el caso de la presa de Opuha, si bien no se realizó un análisis para efectos de disminuir los riesgos (preventivo) o para compensaciones o mitigaciones, sí se tuvieron en cuenta las consecuencias de afectaciones ambientales a comunidades

de peces e insectos para la ejecución de las reparaciones, siendo una de las pocas que exhiben estos análisis, por lo menos en la información disponible.

Cuadro 3-1. Principales eventos de falla o rotura de presa a nivel mundial

ID	PRESA	AÑO FALLA O ROTURA	CONSECUENCIA	POSIBLE CAUSA
1	Pantano de Puentes	1802	Más de 600 muertos	Construcción defectuosa
2	Dale Dike Reservoir	1864	244 muertos y pérdida de infraestructura aguas abajo	Construcción defectuosa
3	South Fork	1889	S.I.	Deficiente mantenimiento
4	Walnut Grove	1890	S.I.	Fuertes nevadas y lluvias
5	Desná	1916	S.I.	Construcción defectuosa
6	Lower Otay	1916	40 muertos y pérdida de infraestructura aguas abajo	Fuertes lluvias
7	Gleno	1923	356 muertos y zonas aledañas arrasadas	Construcción defectuosa
8	Llyn Eigiau	1925	S.I.	Reducción de costos y fuertes lluvias
9	St. Francis	1928	385 muertos	Inestabilidad geológica y error humano
10	Edersee	1943	100 muertos y pérdida de infraestructura aguas abajo	Bombardeo
11	Vega de Tera	1959	144 muertos y pérdida de infraestructura aguas abajo	Construcción defectuosa
12	Malpasset	1959	421 muertos y pérdida de infraestructura aguas abajo, incluyendo dos aldeas, carreteras y vías férreas	Falla tectónica y explosiones en la construcción de una carretera cercana
13	Panshet	1961	S.I.	Fuertes vientos durante construcción
14	Baldwin Hills Reservoir	1963	5 muertos y 277 casas destruidas	Subsidiencia por una sobreexplotación petrolera cercana
15	Vajont	1963	1450 muertos y destrucción total del pueblo de Longarone y cuatro villas	Problemas en las laderas del vaso
16	Fontenelle	1968	S.I.	Desagües sin construir totalmente durante el llenado
17	#3 de Buffalo Creek	1972	125 muertos, 1.121 heridos y más de 4.000 damnificados. 507 casas, 44 casas móviles y 30 empresas quedaron destruidas.	Inestabilidad provocada por una mina de carbón cercana
18	Canyon Lake	1972	237 muertos	Obstrucción del aliviadero
19	Banqiao y Shimantan	1975	171.000 muertos, 11 millones de damnificados, creación de lagos temporales en unos 12.000 kilómetros cuadrados, siete cabeceras municipales inundadas, al igual que miles de kilómetros cuadrados de campo.	Fuertes lluvias superiores a las de diseño
20	Teton	1976	14 muertos y la inundación de las ciudades de Sugar y Reburg	Pantalla permeable, falta de filtros y núcleo poco plástico; tensiones verticales.

Cuadro 3-1. Principales eventos de falla o rotura de presa a nivel mundial (continuación)

ID	PRESA	AÑO FALLA O ROTURA	CONSECUENCIA	POSIBLE CAUSA
21	Euclides da Cunha	1977	S.I.	Mal protocolo de funcionamiento, error humano
22	Kelly Barnes	1977	39 muertos y pérdida de infraestructura aguas abajo	Error de diseño
23	Machhu II	1979	1100 muertos	Cálculos y diseño del aliviadero erróneos
24	Lawn Lake	1982	3 muertos y pérdida de infraestructura aguas abajo	Deterioro estructural
25	Tous	1982	20 muertos, inundación de varios pueblos de la Ribera y pérdida de infraestructura aguas abajo	Deficientes estudios y mantenimiento; negligencia; caudal de la riada superior a la capacidad de desagüe
26	Carsington	1984	S.I.	Plastificación del núcleo arcilloso
27	Val di Stava	1985	268 muertos, 63 edificios y ocho puentes destruidos	Pobre mantenimiento y escaso margen de seguridad
28	Belci	1991	66 muertos	Falla en la apertura de compuertas
29	Opuha	1997	Pérdida de infraestructura aguas abajo, pérdida de poblaciones de peces e insectos	Fuertes lluvias
30	Soběnovská	2002	S.I.	Fuertes lluvias
31	Zayzoun	2002	22 muertos, 4.000 damnificados, más de 8.000 hectáreas de tierras de cultivo arrasadas y pérdida de infraestructura en cinco pueblos	Falta de mantenimiento a pesar de contar con avisos de posible rotura; corrupción
32	Big Bay	2004	104 estructuras fueron documentados como dañadas o destruidas. No se perdieron vidas humanas	Pre-existente filtración
33	Camará	2004	3 muertos y la inundación de los pueblos de Alagoa Grande y Mulungu	Fuertes lluvias
34	Shakidor	2005	70 muertos	Fuertes lluvias
35	Taum Sauk	2005	S.I.	Error informático y/o humano
36	Campos Novos	2006	S.I.	Derrumbe en el túnel
37	Situ Gintung	2009	100 muertos	Fuertes lluvias y escaso mantenimiento

Convención S.I.: Sin Información disponible

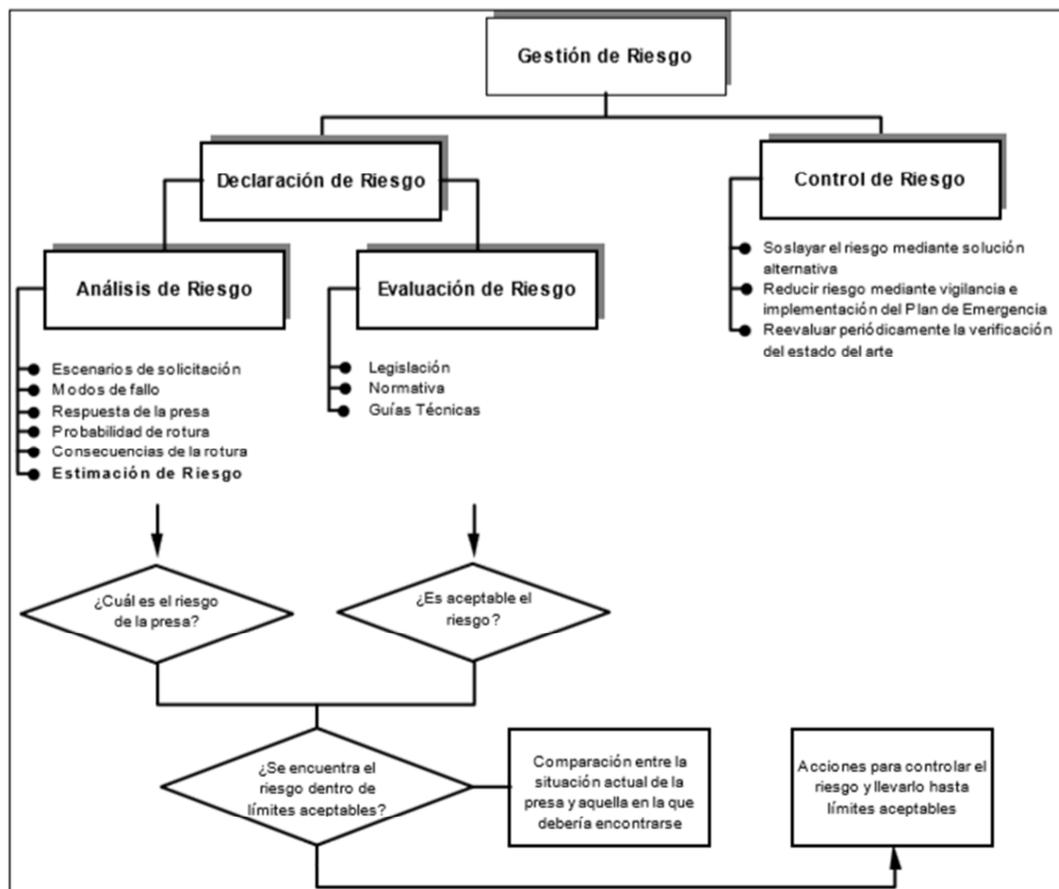
Por lo expuesto anteriormente, y teniendo en cuenta que el análisis del presente trabajo de grado está enfocado a las consecuencias ambientales por el evento del “rompimiento” de la presa, en los siguientes capítulos se desarrollará una revisión sobre el análisis de riesgos por falla o rotura de presa que actualmente se aplica a nivel mundial y se plantearán los elementos que pueden ser afectados por el evento, y una propuesta para el establecimiento de consecuencias ambientales por este tipo de eventos, a partir de la bibliografía existente.

4 ANÁLISIS DE RIESGOS POR FALLA O ROTURA DE PRESAS

El Riesgo puede definirse como la medida de la probabilidad y severidad de un evento que tiene efectos adversos sobre la vida humana, la salud, la propiedad o el medio ambiente. Es estimado mediante la combinación de las esperanzas matemáticas de los escenarios, probabilidades de ocurrencia y sus consecuencias.

Partiendo del análisis bibliográfico de literatura disponible relacionada con el análisis de riesgos, se empieza por definir los principales componentes de la Gestión de Riesgo en presas, cuya estructura se presenta en la Figura 4-1, y posteriormente se describen a nivel general cada uno de ellos:

Figura 4-1. Esquema general para la Gestión de Riesgo en presas



Fuente: Membrillera, M. *et.al.* (2005), adaptado de Kreuzer, 2000.

Declaración del Riesgo (DR): Consiste en valorar la probabilidad de ocurrencia de eventos y del comportamiento estructural de la presa, así como la valoración de las consecuencias producidas por un fallo o un funcionamiento incorrecto de la misma (Análisis de Riesgo - AR), para posteriormente ser comparado con los

critérios de tolerabilidad del riesgo (Evaluación de Riesgo - ER) (Bowles, 2001 En: Triana, 2007).

El Análisis de Riesgo (AR) es una herramienta que a través de la utilización de la información disponible, permite estimar el riesgo que sobre personas, propiedades o medio ambiente puede tener cualquier evento con un potencial para causar daños. Implica una serie de pasos sistemáticos como la identificación de eventos o escenarios susceptibles de provocar daños y la estimación de riesgo (Membrillera, M. et. al. (2005)).

La Evaluación del Riesgo (ER) es un proceso encaminado a examinar y juzgar la importancia del riesgo estimado a la luz de la normativa vigente. Es importante tener en cuenta que la evaluación de riesgos tiene como objetivo determinar si los riesgos existentes son tolerables o no y que el análisis de riesgos debe aplicarse a la situación actual de la presa (ya sea en etapa de diseño o para presas existentes) y a su propio futuro, es decir, después de la aplicación de determinadas medidas de mitigación. Esto permite evaluar por comparación, la eficacia y eficiencia de estas acciones (Membrillera, et al. (2005)).

El Control del Riesgo (CR) es el proceso por el que se implementa y/o refuerzan acciones encaminadas a controlar el riesgo así como la revisión periódica de la efectividad de las mismas (Membrillera M. , 2007).

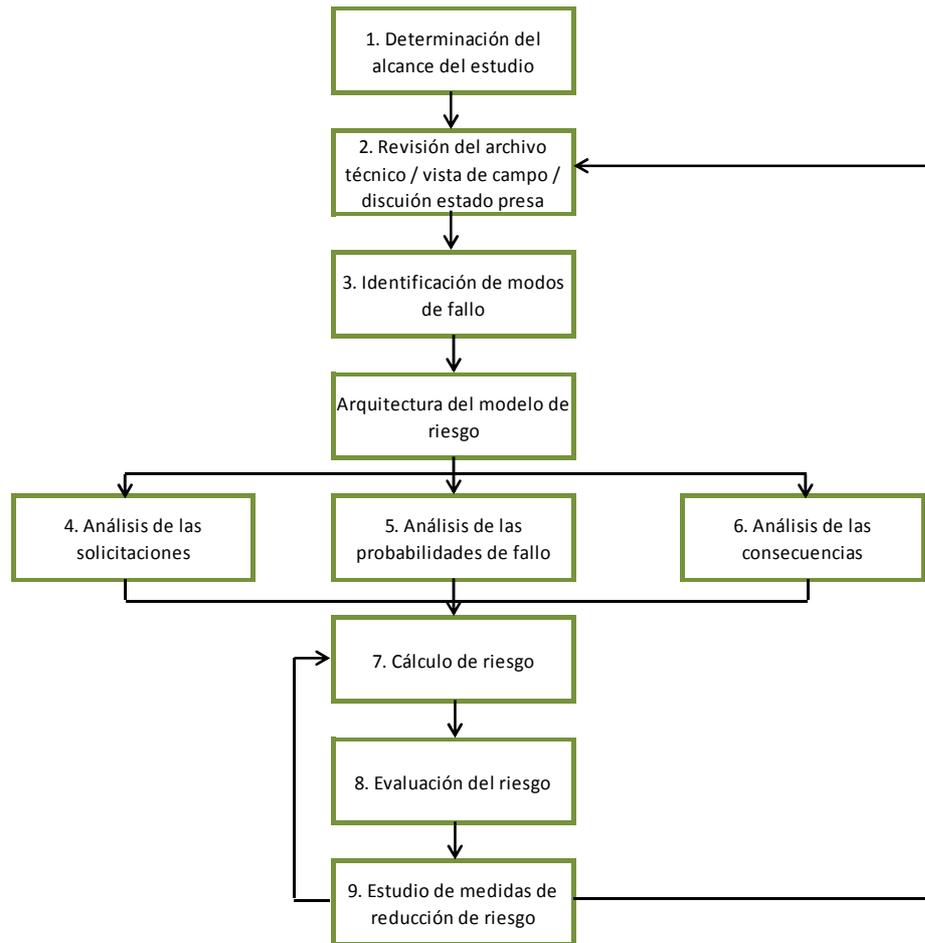
4.1 ANÁLISIS DE RIESGO

En la Figura 4-2 se presenta el proceso para la realización del análisis del riesgo (pasos 1 al 7); cada uno de los pasos se resumen a continuación:

- Paso 1: En primera instancia, de acuerdo con el nivel de detalle de la información disponible para la presa, se determina el alcance del estudio (desde básico a muy detallado), los objetivos y los plazos de los análisis a realizar.
- Paso 2: Posteriormente se debe llevar a cabo la estructuración y examen de la información técnica de la presa (diseño, obras, seguridad, estudios hidrológicos, sísmicos, características de la zona inundable, entre otra). Para presas existentes se debe efectuar una inspección de la misma (visita de campo). Con la anterior información y a través de la participación de un equipo de profesionales que llevará a cabo el análisis, se determina el estado o características de la presa y los problemas existentes o potenciales.
- Paso 3: La identificación de los modos de fallo consiste en identificar, describir y estructurar todas las posibles formas en que la presa puede fallar; el proceso de identificación requiere un conocimiento global del sistema presa-embalse, siendo esencial entender y visualizar el comportamiento de cada uno de los componentes del conjunto, para así detectar la manera en que estos elementos puedan dejar de desempeñar su función, considerando todas las cargas o amenazas posibles (Serrano, 2011).

Dentro de los modos de fallo más comunes se encuentran el desbordamiento y la erosión de las presas de tierra, erosión interna de las presas de tierra o deslizamiento y caída de muros de gravedad (Membrillera y colaboradores (2005)).

Figura 4-2. Esquema del proceso de Análisis del Riesgo



Fuente: Serrano (2011)

Paso 4: El análisis de solicitaciones (cargas o amenazas) permite establecer las fuerzas o peligros que actúan sobre la presa. Este análisis se realiza a través de la evaluación de la información disponible de la presa, los registros históricos y estudios previos. Las cargas Sísmicas, Hidrológicas y Estáticas (cargas hidrostáticas impuestas por el embalse, cargas estáticas o dinámicas impuestas por la operación de varios componentes de la presa, cargas inducidas por deslizamientos en el embalse contra la presa o por fenómenos hidráulicos como filtración, erosión, o cavitación (USBR, 2001, En: Triana, 2007)) son consideradas los principales factores que pueden conducir al fallo de la presa.

Paso 5: De acuerdo con los modos de fallo y las amenazas identificadas, se debe establecer la respuesta del sistema, es decir, la probabilidad condicional de rotura de la presa. Esto se logra a través de una revisión sistemática de la presa a fin de averiguar la forma en que ésta, su cimentación o los equipos hidromecánicos pueden dejar de prestar sus servicios y/o romper bajo las cargas impuestas. Para identificar los diversos métodos para estimar las probabilidades condicionales de rotura en una presa, se ha tomado como referencia a Membrillera, M. (2007) que establece:

- Análisis cuantitativo: Basado en una comprensión detallada del proceso de rotura. Es un método preciso que incluye análisis de fiabilidad (simulaciones de Monte Carlo, métodos FOSM, etc.) y diagramas lógicos, como árboles de eventos o fallos.
- Juicio de Experto: Es la opinión, sobre la verosimilitud de un evento, emitida por un ingeniero entrenado para ello y en condiciones controladas y específicas.
- Referencias históricas: Procedentes de otras presas similares en el pasado dado que, a pesar de que cada presa es única, cuando los métodos históricos se basan en una población numerosa de embalses y se ajustan en función de la edad de la presa analizada y sus condiciones, constituyen una herramienta útil en estudios preliminares o como orden de magnitud.
- Análisis Tradicional o Clásico: Mediante un enfoque empírico considera de forma aislada cada una de las cargas y, finalmente, maneja los coeficientes de seguridad como medida de la bondad del diseño.

Paso 6: Una vez se cuenta con la definición de escenarios y probabilidades de fallo, se procede a establecer las consecuencias provocadas por la rotura de la presa, lo que implica la estimación de las pérdidas directas e indirectas. Dado que este tema es el eje central del presente trabajo, se desarrollará en capítulos posteriores.

Paso 7: La Estimación o cálculo del Riesgo se define como el proceso por el que se cuantifican las componentes del riesgo, esto es, la probabilidad de fallo y las consecuencias asociadas al mismo. Es así como el riesgo es la combinación de tres conceptos: qué puede pasar, cuál es la probabilidad de que pase y cuáles son sus consecuencias. Cuando se realiza un Análisis de Riesgo cuantitativo en seguridad de presas, esta terna se suele reducir a un único número que corresponde al producto de la probabilidad de rotura por sus consecuencias. De forma conceptual se tiene que:

$$R\Delta(r) = p(r) \cdot c\Delta(r)$$

Dónde:

$R\Delta(r)$: Es el riesgo incremental asociado a la rotura de la presa.

$p(r)$: Es la probabilidad de rotura de la presa.

$c\Delta(r)$: son las consecuencias incrementales asociadas a la rotura de la presa (Serrano, 2011).

El término “riesgo” incluye entonces dos aspectos: 1) La probabilidad de que un evento ocurra dentro de cierto período de tiempo. 2) Las consecuencias para la población, las propiedades y el ambiente. La probabilidad de que un evento ocurra y cause daños se reduce si la amenaza o peligro es reconocida por quienes se pudieran ver afectados, y si son comprendidas sus causas y sus efectos. Así mismo, es importante estudiar las consecuencias de efectos combinados.

4.2 EVALUACIÓN DEL RIESGO

En el proceso presentado en la Figura 4-2, la Evaluación del riesgo corresponde al Paso 8 y en él cual se valora la importancia del riesgo asociado a la rotura de una presa. Para que el riesgo sea considerado como tolerable es necesario que se cumplan las siguientes condiciones (HSE, 1999, En: Triana, E. (2007)):

- La sociedad puede vivir con el riesgo asegurando unos ciertos beneficios.
- El riesgo debe estar en un rango en el que no se considere insignificante ni como algo que puede ignorarse.
- El riesgo debe mantenerse en constante revisión.
- Es necesario reducir el riesgo tanto como sea posible (ALARP, del inglés *As Low As Reasonably Practicable* que en español significa *tan bajo como sea razonablemente práctico*).

4.3 CONTROL DEL RIESGO

Este es el último paso (Paso 9) dentro de esquema de la gestión del riesgo (Figura 4-1 y Figura 4-2), en el que se busca definir medidas que permitan mitigar o controlar el riesgo. Dentro del análisis de riesgos en general, este paso se puede denominar Medidas de Intervención, en el que se establece la necesidad de adoptar medidas para el control y reducción de los riesgos (Fondo de Prevención y atención de Emergencias - FOPAE, 2012).

A nivel general, dado que cada caso será particular y resultará del análisis y evaluación del riesgo realizado para cada presa, dentro del control de riesgo se tienen las siguientes actividades:

- Identificar opciones factibles para controlar el riesgo.
- Evaluar las alternativas según su efectividad, eficiencia y riesgo.
- Inferir la aceptación de las opciones por parte de los involucrados.
- Evaluar las opciones para gestionar el riesgo residual.
- Inferir aceptación del riesgo residual por los agentes involucrados.

Para mayor información sobre los procedimientos o metodologías empleadas dentro del análisis del riesgo, se pueden consultar los siguientes autores: Membrillera, *et. al.* (2005), Membrillera, M. (2007), SPANCOLD (2013), Serrano, A. (2011) y Triana, E. (2007).

Tal como se mencionó anteriormente y de acuerdo con el principal objetivo del presente trabajo, en los siguientes capítulos se desarrollará con mayor detalle el Paso 6 – Análisis de consecuencias, con miras a establecer los elementos que pueden verse afectados por el evento de rotura de presa. Para hacer el correspondiente análisis de consecuencias ambientales por fallo o rotura de presa, se tomará como referencia información del proyecto Hidroeléctrico del río Sogamoso - Hidrosogamoso, el cual se encuentra en fase de construcción, cuenta con Licencia Ambiental y dentro del Estudio de Impacto Ambiental incluyó datos del sector aguas abajo de la presa.

5 TIPOS DE CONSECUENCIAS POR LA FALLA O ROTURA DE UNA PRESA

Tal como se presentó en el capítulo anterior, la estimación de consecuencias es un paso inmerso dentro del Análisis de Riesgos (Paso 6, Figura 4-2). A nivel general, se busca identificar las posibles consecuencias para la vida y salud de las personas, para el ambiente y para la propiedad (Fondo de Prevención y atención de Emergencias - FOPAE, 2012).

5.1 TIPOS DE CONSECUENCIAS

Existen varias clasificaciones que permiten establecer el tipo de consecuencias. La primera considera que las consecuencias pueden ser clasificadas de acuerdo con el momento en el que tienen lugar y la forma en que se evalúan; se pueden dividir en directas e indirectas. Las consecuencias directas, para el caso de un evento de falla o rotura de presa, son las ocasionadas directamente por el impacto de la inundación y son las más visibles. Por el contrario, las consecuencias indirectas aparecerán después del impacto del evento y se reflejan en la economía y en otras actividades de la zona. Una segunda clasificación considera que las consecuencias se pueden dividir en tangibles e intangibles, en función de si las consecuencias pueden ser evaluadas en términos económicos o no (SPANCOLD, 2013).

Otro tipo de clasificación por tipo de consecuencia se basa en el medio que es afectado por el evento. De acuerdo con lo indicado por autores o entidades como el Comité Australiano Nacional de Grandes Presas (Australian National Committee on Large Dams Inc. - ANCOLD, 2000), el Comité Nacional Español de Grandes Presas y la Asociación de Profesionales de Ingeniería Civil (Professional Association of Civil Engineers - Spanish National Committee on Large Dams (SPANCOLD, 2013)), Triana, E. (2007) y Serrano, A. (2011), dentro de las consecuencias más relevantes por falla o rotura de presa, en esta clasificación, se pueden considerar las siguientes:

- Pérdida de la vida: hace referencia a la estimación del número de víctimas mortales resultantes de la rotura de la presa. Se deben considerar recomendaciones existentes sobre la tolerabilidad del riesgo, que para este tipo de consecuencia cobra mucha importancia.
- Consecuencias económicas: se incluyen las consecuencias económicas directas producidas por la onda de crecida, las consecuencias indirectas producidas por las inundaciones y las pérdidas económicas por la ausencia del embalse; se incluyen acá las relacionadas con las afectaciones a infraestructura y actividades productivas aguas abajo y las asociadas a la reconstrucción de la presa.
- Consecuencias ambientales (fisicobióticas): Este tipo de daños son difíciles de definir numéricamente y por lo tanto difíciles de integrar en un análisis cuantitativo, pero es importante tenerlas en cuenta. En la actualidad, no es práctico para integrar este tipo de daños numéricamente dentro de un modelo de

riesgo cuantitativo, pero es posible y conveniente para estudiar los efectos que los diferentes eventos del análisis producirían en el medio ambiente, considerarlos cualitativamente.

De acuerdo con lo anterior y conforme con los objetivos del presente trabajo, se considerarán las consecuencias a nivel social, económico y fisicobiótico, ocasionadas por el fallo o rotura de una presa, los cuales se presentan por separado en los siguientes numerales e incorporan consecuencias tanto directas, como indirectas, tangibles e intangibles.

Lo anterior resulta también de la exigencia que se presenta en Colombia, dentro de los Términos de Referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para la solicitud de la Licencia Ambiental para la construcción de presas, represas y embalses con capacidad mayor a 200 millones de metros cúbicos de agua - PR-TER-1-01 del MAVDT (2006), en los que se solicitan dentro del Análisis de riesgos del capítulo 9. Plan de Contingencia, considerar, al menos los siguientes factores, los cuales coinciden con la clasificación ya indicada:

- *Víctimas: número y clase de víctimas, así como también el tipo y gravedad de las lesiones.*
- *Daño ambiental: evalúa los impactos sobre el agua, fauna, flora, aire, suelos y comunidad, como consecuencia de una emergencia.*
- *Pérdidas materiales: representadas en infraestructura, equipos, productos, costos de las operaciones del control de emergencia, multas, indemnizaciones y atención médica, entre otras.*

5.2 CONSECUENCIAS O EFECTOS SOCIOECONÓMICOS

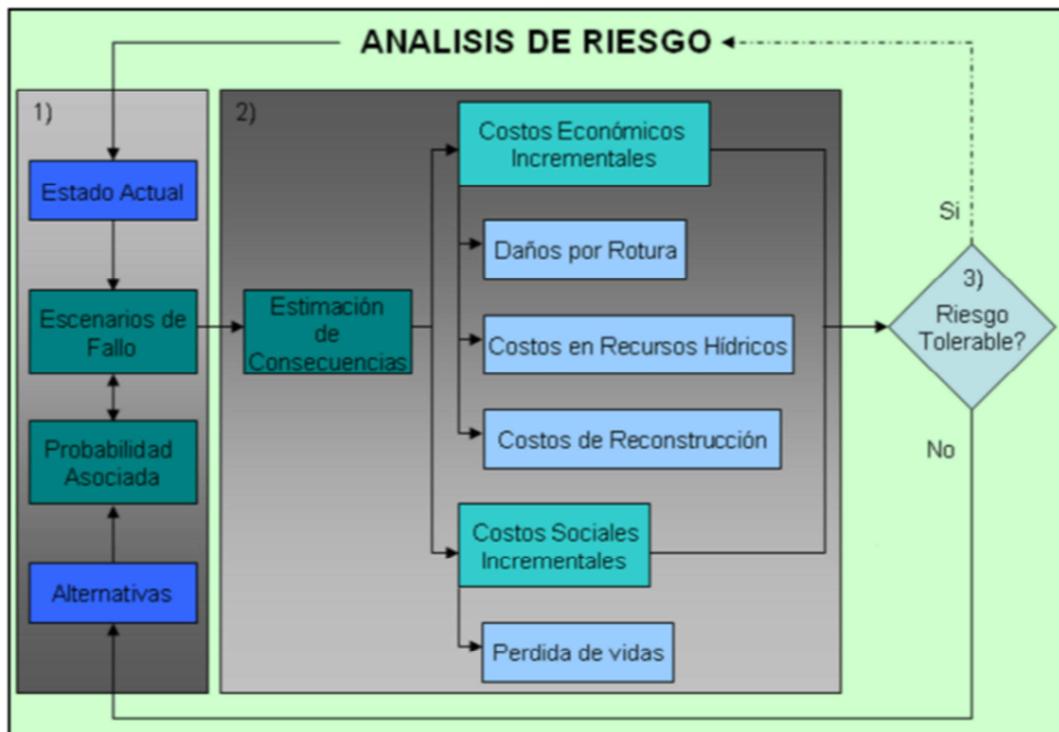
Los efectos sociales y económicos han sido ampliamente incorporados dentro de la estimación de consecuencias por falla o rotura de presa. Actualmente, para la valoración de consecuencias por el fallo de presa o actuaciones en seguridad, se cuenta con una estructura (Figura 5-1) que permite conjugar las consecuencias por daños en inundación, costos de reconstrucción, efectos sobre los sistemas de aprovechamiento de recursos hídricos y pérdida de vidas (Triana, 2007), para que así de manera resumida, clara y secuencial, se valoren las consecuencias socioeconómicas.

El flujograma presenta la estimación de consecuencias en función de la valoración de los costos económicos (en términos monetarios) y los costos sociales en número de víctimas mortales y en la que se busca encontrar los efectos incrementales dentro del análisis de riesgos, donde cada escenario (Escenario Actual y Alternativas en la Figura 5-1) son valorados considerando el funcionamiento correcto, así como el fallo de la presa. Estimadas las consecuencias es necesario que sea evaluado el riesgo con el fin de plantear alternativas para la reducción del riesgo. Estas deben ser igualmente evaluadas en sus consecuencias volviendo al punto 1, el proceso deberá seguirse individualmente para cada alternativa.

De acuerdo con la estructura planteada, la estimación de los costos económicos estará compuesta por 3 factores:

- Daños por rotura o inundación: los cuales pueden ser estimados por metodologías generales o específicas, incluyendo aquellos costos indirectos diferentes a la pérdida de beneficios debidos la escasez producida por el fallo de presa.
- Costos en recursos hídricos: pérdida de beneficios debidos la escasez producida por el fallo de presa.
- Costos de reconstrucción: los costos que conlleva la puesta en marcha de una nueva presa y que pueden ser evaluados utilizando valores de un proyecto real actual o en su defecto por la actualización (traer a valor presente) de los costos de construcción de la presa en estudio.

Figura 5-1. Estructura General para la Estimación de Consecuencias en el Análisis de Riesgos



Fuente: Triana, E. (2007).

La estimación de pérdida de vidas por su parte, puede realizarse estimando las personas en riesgo localizadas en las zonas inundadas (determinadas con la modelación hidráulica) y aplicando metodologías basadas en coeficientes o tasas de mortalidad (Triana, 2007).

5.3 CONSECUENCIAS O EFECTOS AMBIENTALES (FISICOBÍOTICOS)

Se considera en este apartado los efectos que sobre el ambiente natural (medio físico y biótico) pueden generarse por un evento de falla o rotura de presa. Tal como se ha enunciado anteriormente, estos efectos son los menos incorporados en los análisis de riesgos y son los más difíciles de evaluar dado su carácter intangible o la complejidad de cuantificarlos. Sin embargo, debido a la importancia de su inclusión dentro del análisis de riesgos, se realiza acá una propuesta de los componentes físicos o bióticos que pueden tenerse en cuenta dentro de la estimación de consecuencias ambientales.

Con miras a realizar la propuesta planteada en el párrafo anterior se tomó como caso hipotético la rotura de la presa del Proyecto Hidroeléctrico del Río Sogamoso, la cual cuenta actualmente con Licencia Ambiental y está en fase de construcción. El Estudio de Impacto Ambiental fue elaborado en 1996 por INGETEC para ISAGEN e incluyó dentro del mismo, información sobre la zona aguas abajo de la presa, razón por la cual se seleccionó para la realización de la propuesta y desarrollo de la definición de consecuencias fisicobióticas del presente trabajo.

Como se verá en el capítulo 6, para llevar a cabo los análisis de consecuencias se deben tener en cuenta diversas combinaciones, tales como el área potencialmente inundable para cada uno de los escenarios de fallo, nivel del embalse al momento del evento, época del año, etc. Debido a que en este trabajo se realiza una primera aproximación a la estimación de consecuencias ambientales y a que la información con la que se cuenta es limitada, el análisis se realizó para el área de inundabilidad del bajo Sogamoso (aprox. 212 km², Véase Anexo 2), establecida en el mismo EIA mediante el estudio geomorfológico del área, el uso de información cartográfica de diferentes épocas, fotointerpretación, visitas de campo en toda la zona, aguas abajo del sitio de presa.

El Proyecto Hidroeléctrico del Río Sogamoso está localizado en la región Nororiental de Colombia, en el Departamento de Santander. La presa y el embalse están ubicados en jurisdicción de los municipios de Girón, Betulia, Zapatoca, Los Santos y San Vicente de Chucurí, en el Departamento de Santander (Figura 5-2).

La presa está conformada por un relleno de gravas de los depósitos aluviales del río y de enrocado proveniente de las excavaciones de otras obras del proyecto; sobre el espaldón de aguas arriba tiene una losa de concreto como elemento impermeable.

Figura 5-2. Localización Proyecto Hidroeléctrico del río Sogamoso



Fuente: Google Earth. Foto: José Suarez García.

La altura de diseño de la presa fue de 190 m, con un volumen aproximado de 8'400.000 m³ de rellenos (6'000.000 m³ de gravas y 2'400.000 m³ de enrocado), con taludes 1,5 H: 1 V en ambas caras, con su cresta en la elevación 330 msnm y una berma de coronación de 9 m de ancho. El caudal medio natural en el sitio de presa es de 471,5 m³/s. El embalse fluctuará entre un nivel máximo normal en la cota 320, con un volumen de 4.800 Hm³ y un área de 6.960 ha, y un nivel mínimo normal en la cota 290, con un volumen de 2.800 Hm³ y un área de 5.240 ha (INGETEC - ISAGEN, 1996).

El área de influencia del proyecto se extiende también a la zona del bajo río Sogamoso, hasta su desembocadura en el río Magdalena. En el Estudio de Impacto Ambiental, se identificaron en esta zona 944 unidades familiares (4200 habitantes) de las cuales 598 (63%) dependen, en algún grado, de la pesca. El 12,2% de la zona inundable es utilizada para la siembra de cultivos de plátano, yuca y maíz solos o en arreglos como cultivos asociados, el 3,5% no son utilizadas por las comunidades dadas las frecuentes inundaciones que se presentan y el 84,3% son dedicadas a pastos (INGETEC - ISAGEN, 1996).

A pesar de la complejidad de establecer los efectos físicos y bióticos que se pueden presentar ante un evento de rotura de la presa, con miras a sintetizarlos para poder incorporarlos al análisis de consecuencias ambientales dentro de la estructura del análisis de riesgos (Figura 5-1), de manera resumida se presentan a continuación los elementos fisicobióticos que pueden ser afectados por el evento de rotura de la presa de Hidrosogamoso, de acuerdo con la información presentada para el sector aguas abajo de la presa en el capítulo de Diagnóstico del área de influencia del respectivo EIA (Cuadro 5-1). Debido a que no se cuenta con cartografía detallada que presente áreas afectadas, no es posible cuantificar las consecuencias pero se indican de manera cualitativa para su evaluación y análisis.

Cuadro 5-1. Componentes y elementos que pueden verse afectados por el evento de rotura de la presa de Hidrosogamoso

MEDIO	COMPONENTE	ELEMENTO O SUJETO	HIDROSOGAMOSO – AGUAS ABAJO
Físico	Suelos	Usos del suelo	Conservación Aprovechamiento selectivo Ganadero Agrícola
	Agua	Uso potencial del agua – drenajes superficiales	Río Sogamoso Quebrada La Doradas Caño Matore Brazo El Estanco Brazo del Opón Quebrada La Ceibita Caño Guarumo Caño La Jeringa Caño El Llanito Caño San Silvestre Caño Maldonado

Cuadro 5-1. Componentes y elementos que pueden verse afectados por el evento de rotura de la presa de Hidrosogamoso (continuación)

MEDIO	COMPONENTE	ELEMENTO O SUJETO	HIDROSOGAMOSO – AGUAS ABAJO
Físico	Atmósfera	Composición de la atmósfera	Zonas donde se deposite sedimento contaminado*
	Procesos geofísicos	Geoformas	Diques (elevaciones del terreno que acompañan a los ríos). Complejo de Orillares (zonas bajas cortadas por caños y diques y se presentan en los playones de río y en las islas). Napas de Explayamiento (zonas amplias en la llanura, con inundaciones periódicas). Áreas Depresionales. Terrazas bajas.
		Sedimentación	Deposición de sedimento en el lecho del río y en el complejo de ciénagas*
	Morfología y paisaje	Modificación aspecto visual – calidad paisajística	Tanto en el tramo recto (en donde el río fluye encañonado), en el tramo trezado (con pendiente entre el 0,1% y el 0,2%) y el tramo meándrico con longitud 30 km y pendiente inferior al 0,1% del río Sogamoso. En las laderas que queden expuestas. En el complejo cenagoso aguas abajo.
Biótico	Ecosistemas acuáticos	Comunidades acuáticas	Macroinvertebrados bentónicos Algas perifíticas Fitoplancton Zooplancton Fauna ictica (peces)
		Ecosistemas de importancia ecológica	Ciénaga El Llanito Ciénaga Pozalarga Ciénaga San Silvestre
	Ecosistemas terrestres	Ecosistemas de importancia ecológica o áreas protegidas	Distrito de Manejo Integrado Regional San Silvestre
		Vegetación	Bosque natural Bosque secundario intervenido Bosque de galería Rastrojo alto y bajo Pastos arbolados Pastizales Cultivos
		Fauna	276 especies de aves – 41 exclusivas de las ciénagas y vegetación de ribera 123 especies de mamíferos – 16 exclusivas de cuerpos de agua y vegetación de ribera 44 especies de herpetofauna – 7 exclusivas de cuerpos de agua y vegetación de ribera

*Requiere de una modelación de los sedimentos para establecer la manera en que se distribuyen en el cauce y en el área de inundación.

Para entender la dinámica del evento, se elaboró un árbol de consecuencias en el que se visualiza la cadena de sucesos que se pueden generar una vez se ha presentado la rotura de la presa (Véase Anexo 3) y en la que se visualizan no solo los efectos directos sino también los indirectos, derivados de los anteriores o resultado de estos. El árbol se elabora con las siguientes condicionantes:

1. El análisis se realiza considerando desde el evento y no lo que lo origina, es decir, no se incluyen los sucesos que desencadenan la rotura de la presa.
2. No se consideran las consecuencias socioeconómicas ya que como se ha explicado anteriormente, estas son ampliamente evaluadas en la actualidad.
3. Como evento de rotura se considera la generación de una brecha en una presa que permite la evacuación del volumen total del agua almacenada en el embalse de manera súbita o lenta pero sin control.

Para la elaboración del árbol, se desagregó el evento de rotura en los efectos aguas arriba y aguas abajo de la presa, si bien el análisis se realiza solamente para aguas abajo de la misma; para establecer tales efectos, se consideraron por separado los diferentes elementos que salen al momento de la rotura, tales como agua, sedimentos de fondo y los restos de estructuras de la presa, para así mostrar la afectación que cada uno genera, aunque en el momento del evento, esto sea un conjunto y el agua sea la que mayor volumen y por ende, la que mayor afectación genera.

Adicionalmente, el árbol se diseñó bajo un enfoque ecosistémico y presenta las acciones macro ocasionadas por la rotura (salida de agua, salida de sedimentos y salida de restos de estructuras de la presa); posteriormente se muestran los efectos o impactos primarios y los secundarios, luego los ecosistémicos integrales (impactos ocasionados por la suma de los anteriores) y finalmente la afectación de servicios ecosistémicos, entendidos estos últimos como las funciones biológicas, físicas y químicas dentro de los ecosistemas que sostienen la vida y el bienestar del ser humano (Thrush & Dayton (2010), En: Vidal, L. (2010)).

Con la salida de agua, la cual tiene alto poder erosivo, se presenta una salida de concentraciones de materia orgánica, gases reducidos y fauna y vegetación acuática que se encontrarían en el área embalsada, los cuales se consideran como impactos primarios. Estos ocasionan impactos secundarios tales como la erosión de laderas, arrastre de vegetación, migración y muerte de fauna terrestre o acuática. La conjugación de los anteriores impactos, generan unos impactos ecosistémicos integrales, tales como alteración del paisaje y del uso potencial del suelo, pérdida de hábitats y disminución de poblaciones de fauna y de flora (Véase Anexo 3).

La salida de los sedimentos que se encontraban en el fondo del área embalsada, por su parte, puede ocasionar algunos de los impactos primarios indicados para la salida del agua y de manera particular, aportar sedimentos al lecho del río. Como impactos secundarios se pueden presentar, diferentes a los enunciados para la anterior acción, la alteración de las propiedades fisicoquímicas del suelo en el área inundable, la reducción de hábitats acuáticos en la planicie aluvial y cambios en la geomorfología del cauce. Estos ocasionan impactos integrales como la alteración de

la dinámica hidráulica del sistema y la alteración del uso potencial del suelo (Véase Anexo 3).

En cuanto a la salida de materiales de la presa, estos pueden ser de diferentes granulometrías, razón por la cual los efectos difieren dependiendo de estas. Como se puede observar en el Anexo 3, esta acción genera varios de los impactos primarios y secundarios ya expuestos para las dos acciones anteriores (salida de agua y de sedimentos).

Como ya se manifestó, los impactos anteriormente referenciados, ocasionan otros impactos ecosistémicos integrales y la afectación de servicios ecosistémicos. Dentro de estos se encuentran la pérdida de oferta de espejo de agua para actividades recreativas, alteración de la estructura ecológica del paisaje, de suelos para actividades agropecuarias, de la dinámica ecológica, de la productividad acuática, ecosistémica terrestre y agropecuaria, así como la pérdida de biodiversidad.

Como se puede visualizar en el árbol realizado (Anexo 3), las consecuencias que sobre los componentes físicos y bióticos se pueden presentar ante un evento de rotura de presa son diversas y difícilmente medibles o valoradas económicamente, además de incluir efectos tanto directos e indirectos como de corto o largo plazo. Por este motivo, para poder integrarlos en un esquema de estimación de consecuencias como el presentado para los componentes socioeconómicos (Figura 5-1), se propone abordar estas consecuencias a través de unos indicadores (los cuales serán explicados en el siguiente capítulo) que permitan calificar y/o cuantificar cada uno de los niveles evidenciados en el árbol.

Tal como se exhibe en el árbol (Anexo 3), las consecuencias se presentan principalmente en los ecosistemas acuáticos y terrestres, aguas abajo de la presa, razón por la cual se divide el análisis en estos y para cada uno de ellos, se subdivide en los indicadores que permiten valorar el medio físico y el biótico, si bien algunos permiten evaluar los dos ecosistemas dado que se relacionan con servicios ambientales, así:

1. Ecosistemas acuáticos:

Medio físico:

- Concentraciones de OD, DBO y DQO en el agua
- Concentraciones de SDT, SST y SS
- Espejo y volumen de agua
- Morfología del cauce
- Régimen de inundaciones
- Espejo de agua (ha)

Medio biótico:

- Productividad pesquera

2. Ecosistemas terrestres:

Medio físico:

- Concentraciones de H₂S en la atmósfera
- Áreas desnudas (ha)
- Zonas anegadas (ha)
- Propiedades fisicoquímicas de los suelos
- Calidad paisajística
- Áreas de suelo por clases agrológicas (ha)
- Productividad agropecuaria

Medio biótico:

- Cobertura vegetal (ha)
- Calidad y cantidad de hábitats
- Poblaciones de fauna
- Poblaciones de flora
- Fragmentación
- Uso flora
- Diversidad Alfa y Beta

En el siguiente capítulo se presentan opciones de metodologías, métodos, modelos o análisis que permiten establecer el valor incremental de cada uno de los indicadores y así poder incorporarlos al análisis de riesgos; se incluyen tanto los empleados actualmente para las consecuencias socioeconómicas como las que permitan establecer los indicadores acá propuestos para las fisicobióticas.

6 VALORACIÓN DE CONSECUENCIAS POR LA FALLA O ROTURA DE UNA PRESA

En Australia, se cuenta con directrices sobre la evaluación de las consecuencias de la rotura de la presa (Australian National Committee on Large Dams Inc. - ANCOLD, 2000). Una evaluación de consecuencias es el proceso total de colecta de información acerca de las potenciales consecuencias de un fallo de presa, identificando la severidad de estas consecuencias; y determinar así una categoría de consecuencia para la presa que se puede utilizar en la toma de decisiones preliminares relativas a la asignación de recursos para el diseño, la construcción (nuevas presas y obras correctivas), operación, mantenimiento y vigilancia de una presa y/o de sus características.

En dicha directriz, se recomiendan metodologías para describir y cuantificar las consecuencias por el fallo de una presa y provee una categorización de riesgo para presas, basado en dichas consecuencias. Establece así mismo, unas variables a considerar para las consecuencias ambientales.

Dentro de la información que se debe recolectar para realizar la evaluación, se encuentra (aunque no se restringe a la acá indicada), la siguiente:

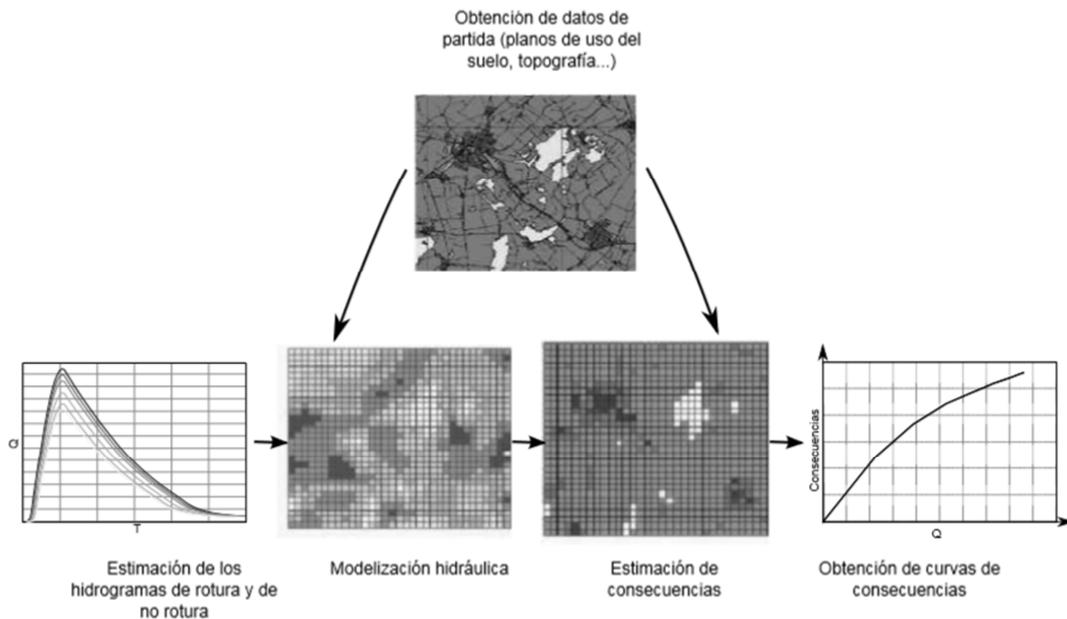
1. Información de la presa y del embalse: Tipo, aliviadero, instalaciones de control de inundaciones, dimensiones, capacidad del embalse y altura de la presa, zonas de depósito, posibles causas y modos de fallo, datos de diseño, fundaciones y condiciones inusuales o particulares, datos del diseñador o constructor, etc.
2. Información topográfica: forma y pendiente del valle, controles de flujo aguas abajo como obras de arte, vegetación, puentes, diques, terraplenes, superficies rugosas y almacenamientos temporales, llanuras de inundación, etc.
3. Características de la inundación: Niveles históricos, estudios hidrológicos, datos hidrográficos, modelos de lluvia-escurrimiento, análisis cualitativos y cuantitativos de la inundación en época de verano o de altas precipitaciones, entre otros.
4. Información de la comunidad aguas abajo: localización, tamaño y tipo de áreas pobladas dentro de la zona de posible inundación, patrones temporales de poblamiento incluyendo empleos, infraestructura que puede ser afectada, demandas de agua, uso del suelo y presencia de sustancias tóxicas, etc.
5. Medio ambiente: canales, humedales, vegetación, capa superficial del suelo, fauna, visual, áreas de valor ambiental reconocido, entre otras.
6. Implicaciones a servicios y negocios: importancia del almacenamiento para los negocios, capacidad financiera del propietario para cubrir los costos del fallo, valor del agua almacenada, etc.

Como guía se mencionan las Normas para la seguridad de presas elaboradas por la Autoridad Nacional de los Servicios Públicos de la República de Panamá - ASEP (2010), en el aparte del Análisis de inundación aguas abajo de presas, se indica que se debe contar, entre otra, con la siguiente información para la determinación de las

consecuencias: normas de manejo de agua de los embalses y centrales hidroeléctricas en el área de estudio, a fin de definir los distintos escenarios de la propagación de la onda generada por la rotura de presa; datos para el análisis de condiciones de borde como hidrogramas de crecidas entrantes al embalse, volúmenes de embalse, geometría de río y rugosidades típicas; áreas donde pueden originarse cantidades importantes de material en suspensión, tales como madera o sedimentos, por ejemplo; mapas en escala de la zona de estudio, mostrando secciones transversales y curvas de nivel, localización de estructuras, ferrocarriles, carreteras, etc.; mapas que muestren la afectación potencial de áreas con potenciales daños a propiedades y pérdidas de vidas.

El principal objetivo de la estimación de consecuencias es la obtención de una relación entre el hidrograma de salida de la presa (de rotura y de no rotura), obtenidos de la laminación de las avenidas y los hidrogramas de rotura como se muestra en la Figura 6-1, y las consecuencias, ya que de esta forma se pueden relacionar directamente con la situación analizada. Conviene hacer hincapié en que en el modelo de riesgo, las consecuencias serán estimadas para cada caso de estudio en dos ocasiones, para la hipótesis de fallo de la presa y para la hipótesis de no fallo, obteniendo mediante su resta las consecuencias incrementales (Serrano, 2011).

Figura 6-1. Procedimiento general para la estimación de consecuencias de inundación



Fuente: SPANCOLD (2013)

A partir de estos datos se realiza una modelización hidráulica de la inundación para aplicar las diferentes metodologías de estimación de consecuencias, para los diferentes escenarios modelados (Serrano, 2011).

Actualmente, la estimación de consecuencias se realiza estableciendo los costos económicos incrementales y los costos sociales incrementales. Las consecuencias incrementales pueden obtenerse como la diferencia entre las consecuencias producidas en un escenario de riesgo en el que no se produce fallo de presa y las consecuencias producidas en ese mismo escenario pero considerando el fallo de presa (Triana, 2007).

El costo social incremental es calculado a través del potencial de pérdida de vidas, estimado a partir de la población expuesta usando tasas de mortalidad basadas en las características del flujo y de los posibles lugares de refugio (edificios, construcciones...), cuándo y cómo se producen los mensajes de aviso a la población, diferencia de tiempo entre que empieza el aviso hasta que llega la inundación, entre otras (Serrano, 2011).

Los costos económicos incrementales por su parte, son valorados teniendo en cuenta los daños por rotura e inundación, en el que se consideran el valor total de las propiedades del área como base del cálculo y los daños como un porcentaje del valor total de la propiedad; los daños de las áreas agrícolas que pueden ser estimados como la diferencia entre el beneficio obtenido antes y después de la inundación; se tienen en cuenta también los costos de limpieza o replantación; el valor comercial según el tipo de actividad afectada y el número de empleados; mientras que para el costo de daños en vías férreas y carreteras se propone un costo fijo por kilómetro construido.

Igualmente, se consideran los costos en recursos hídricos, traducido en el perjuicio económico de la insatisfacción de demandas debido al fallo de presa y puede definirse como la diferencia entre el beneficio económico percibido por cada uno de los usuarios del sistema debido al aprovechamiento del recurso sin la aplicación de esta actuación o el fallo de presa y dicho beneficio con la aplicación de la actuación o fallo de presa. Finalmente, dentro de los costos económicos se consideran los costos de reconstrucción.

Como guía para mayor información sobre los análisis y metodologías empleadas para la estimación de consecuencias sociales y económicas por fallo o rotura de presa, se pueden revisar las Tesis de Doctorado de Triana, E. (2007) y Serrano, A. (2011), en las que los autores desarrollan estudios de caso.

Tal como se ha manifestado a lo largo del presente trabajo de grado, la estimación de consecuencias ambientales (fiscobióticas) es de difícil cuantificación, principalmente a nivel monetario. Sin embargo, se presenta a continuación una propuesta para llevar a cabo la valoración de éstas, mediante el desarrollo de los indicadores presentados en el capítulo anterior.

El sistema de indicadores mostrado en el árbol de consecuencias, se estructura para medir las consecuencias que sobre los ecosistemas acuáticos y terrestres ocasionaría un desembalse originado por la rotura en la estructura de la presa; el sistema de indicadores se estructura para medir los cambios en varios niveles, que van desde parámetros básicos necesarios para el normal funcionamiento de los

ecosistemas y organismos (asociados a los impactos primarios), hasta las alteraciones en los servicios ecológicos y ambientales.

Como ya se manifestó, dentro del análisis de riesgos se requiere establecer valores incrementales, es decir, **la resultante de la comparación entre el estado base y el post-evento**. Para lograr esto en el caso de las consecuencias sobre los componentes físicos y bióticos, es necesario que en primera instancia se determinen los mapas de inundación aguas abajo de la presa, de acuerdo con los modos de fallo identificados, para así determinar el escenario crítico, que establezca la mayor área potencial de inundación. Con ésta, para los diferentes indicadores se deben definir los sitios de monitoreo o estudio, tanto en el escenario sin rotura como en el con rotura, de acuerdo con los parámetros de representatividad o importancia que determine el especialista de cada área temática (es importante recordar que el análisis de riesgos se lleva a cabo por un equipo interdisciplinario).

De esta manera, para cada uno de los indicadores se debe realizar la caracterización de los diferentes parámetros aguas abajo de la presa, para contar con una línea base que permita hacer la comparación para los escenarios con rotura. En el caso de análisis de riesgos que se realicen previo a un evento de rotura, se requiere hacer modelaciones de calidad de agua, de sedimentos e hidráulicos, para establecer las potenciales consecuencias y la cobertura de las mismas. Si la estimación de consecuencias se efectúa después de una rotura de presa, la evaluación post-evento se debe realizar tan pronto pase el evento y determinar de acuerdo con la magnitud del mismo, cada cuanto se requiere de una nueva evaluación, debido a que hay consecuencias que no se pueden valorar a corto plazo.

Adicionalmente, algunas consecuencias que en un principio pueden ser consideradas como negativas para el sistema, a mediano o largo plazo pueden ser asimiladas por el mismo o generar cambios que no requieren de intervención.

A continuación se presenta el objetivo de cada uno de los indicadores expuestos en el capítulo anterior para la estimación de consecuencias para los ecosistemas acuáticos y terrestres, en los componentes físicos o bióticos, los cuales pueden incorporarse dentro de la estructura de la estimación de consecuencias, si bien algunos estén encaminados a la valoración de servicios ecológicos (integran los anteriores y hacen referencia a productividades o funcionamientos) y servicios ambientales (similar a lo anterior pero con un enfoque social) (Figura 5-1).

Para algunos de los indicadores se presenta la fórmula para el cálculo del mismo; para otros, las variables deberán ser establecidas específicamente según el caso analizado dadas las particularidades del área de estudio y del evento, pero deben permitir la estimación de la consecuencia. También se presenta una propuesta de la manera en que se debe capturar la información y algunas metodologías que pueden emplearse para la valoración de los mismos.

1. Indicadores para ecosistemas acuáticos:

Medio físico

- Concentraciones de OD, DBO y DQO en el agua:

$$\begin{aligned}
 IQ &= [OD]_{tn} - [OD]_{t0} \\
 IQ &= [DBO]_{tn} - [DBO]_{t0} \\
 IQ &= [DQO]_{tn} - [DQO]_{t0} \\
 IQ &\text{ debe tender a cero}
 \end{aligned}$$

Donde, IQ = Índice de Calidad del Agua

OD = Oxígeno Disuelto

DBO = Demanda Biológica de Oxígeno

DQO = Demanda Química de Oxígeno

OD, DBO o DQO t_n = Es el valor del parámetro medido post-evento, las veces en que dicha medición se realice o como resultado de la modelación que se lleve a cabo.

OD, DBO o DQO t_0 = Es el valor del parámetro medido en la línea base o pre-evento.

IQ debe tender a cero, es decir, se espera que las condiciones antes y después del evento sean similares.

Para establecer el valor de IQ incremental, se resta del valor medido post-evento o según los resultados de la modelación de calidad del agua, la concentración de OD, DBO o DQO que se registre en el monitoreo de línea base o pre-evento. Se requiere la realización de mediciones de estos parámetros en el agua en sitios establecidos aguas abajo de la presa que sean representativos, de acuerdo con el máximo escenario de inundación; el muestreo debe ser realizado por un laboratorio y puede estar incluido (para la línea base) dentro de los monitoreos que se realizan para el embalse.

El objetivo que se tiene con este indicador es determinar si se presenta un aumento en las concentraciones de materia orgánica e inorgánica en el sistema, lo que podría conllevar a una posible eutrofización del agua, especialmente en la planicie de inundación, un consumo importante de oxígeno disuelto hasta eventuales condiciones de anoxia (con la consecuente afectación directa a los organismos acuáticos) y un eventual aumento excesivo de nutrientes en el suelo, aguas abajo de la presa. El valor del índice debe tender a cero, ya que no deberían haber diferencias en las concentraciones o de lo contrario, se deben evaluar estrategias de mitigación y/o compensación (Véase próximo capítulo), teniendo en cuenta los resultados de los otros indicadores valorados, para que el sistema logre retornar a su estado inicial.

- Concentraciones de SDT, SST y SS:

$$\begin{aligned}
 IQ_s &= [SDT]_{tn} - [SDT]_{t0} \\
 IQ_s &= [SST]_{tn} - [SST]_{t0}
 \end{aligned}$$

$$IQs = [SS]tn - [SS]t0$$

IQs debe tender a cero

Donde, IQs = Calidad del Agua por sólidos

SDT = Sólidos Disueltos Totales

SST = Sólidos Suspendidos Totales

SS = Sólidos Sedimentables

SDT, SST o SS tn: Es el valor del parámetro medido post-evento, las veces en que dicha medición se realice o como resultado de la modelación que se lleve a cabo.

SDT, SST o SS t0: Es el valor del parámetro medido en la línea base o pre-evento.

IQs debe tender a cero, es decir, se espera que las condiciones antes y después del evento sean similares.

Para establecer el valor de IQs incremental, se resta del valor medido post-evento o según los resultados de la modelación de calidad del agua, la concentración de SDT, SST o SS que se registre en el monitoreo de línea base o pre-evento. Dentro de los monitoreos que se realizan normalmente para el área del embalse, se pueden incluir puntos aguas abajo de la presa de acuerdo con aquellos que se consideren representativos según los escenarios de inundación; el muestreo debe ser realizado por un laboratorio.

El objetivo que se tiene con este indicador es determinar si se presenta un aumento en las concentraciones de sólidos disueltos, suspendidos o sedimentables en el sistema, lo que podría conllevar a una pérdida de potencial uso del agua y un aporte de sedimentos al cauce y zona inundable, aguas abajo de la presa. Un incremento de los sólidos en el agua conlleva a la eliminación temporal de organismos perifíticos y bénticos por abrasión y colmatación de superficies que son hábitat para estos organismos, en peces en la obstrucción de las branquias disminuyendo la capacidad para asimilar oxígeno, entre otros.

El valor del índice debe tender a cero, ya que no deberían haber diferencias en las concentraciones antes y después del evento; en caso de presentarse éstas, se deben determinar estrategias de mitigación y/o compensación (Véase próximo capítulo), teniendo en cuenta los resultados de los otros indicadores valorados, para que el sistema logre retornar a su estado inicial.

- Espejo y volumen de agua:

$$HAPI = EA_{t0} - EA_{tn}$$

$$HAPI = VA_{t0} - VA_{tn}$$

HAPI debe tender a cero

Donde, HAPI = Hábitats acuáticos planicie de inundación

EA = Espejo de agua hectáreas

VA = Volumen de agua

EA y VA t_n : Es la cantidad de hectáreas o el volumen presente en el área post-evento, las veces en que dicho cálculo se realice o como resultado de la modelación que se lleve a cabo.

EA y VA t_0 : Es la cantidad de hectáreas o el volumen presente en el área en la línea base o pre-evento.

HAPI debe tender a cero, es decir, se espera que las condiciones antes y después del evento sean similares.

Para establecer el valor de HAPI incremental, con relación a EA, se restan de las hectáreas de espejo de agua presentes en los sistemas lénticos aguas abajo de la presa, según la línea base o pre-evento, las hectáreas de espejo de agua calculadas post-evento o según los resultados de la modelación de los escenarios. Mediante el uso de imágenes de satélite, fotografías aéreas u ortofotos, se establecen las hectáreas de espejo de agua que se presentan en los sistemas lénticos (humedales, áreas inundables, etc.) aguas abajo de la presa, para las diferentes manchas de inundación que se establezcan.

Para el caso del VA, se resta del volumen inicial establecido para los ecosistemas lénticos presentes aguas abajo de la presa, el volumen resultante del evento, ya sea posterior al mismo o como resultado de los escenarios realizados. Para establecer la línea base o posterior a un evento de rotura de presa, se requiere la realización de batimetrías en dichos ecosistemas; para el análisis de riesgos de presas que no han sufrido rotura, se deben efectuar modelaciones de inundabilidad y de sedimentos.

El objetivo que se tiene con este indicador es determinar si se presenta una disminución en el espejo de agua y volumen de los ecosistemas lénticos presentes aguas abajo de la presa, una vez se presente el evento, lo que implica que se reduzcan hábitats acuáticos en las planicies aluviales por causa de la inundación. El eventual incremento de áreas inundadas podría en principio incrementar la productividad biológica; sin embargo el ingreso de sedimentos con características limnológicas adversas (altas concentraciones de BDO y de compuestos reducidos), tendría un efecto adverso.

El valor del índice debe tender a cero, ya que no deberían haber diferencias en las áreas de espejo de agua y el volumen, antes y después del evento; en caso de presentarse un aumento de éstas, se deben determinar estrategias de mitigación y/o compensación (Véase próximo capítulo), teniendo en cuenta los resultados de los otros indicadores valorados, para que el sistema logre retornar a su estado inicial.

- **Morfología del cauce:**

Con la realización de batimetrías en diferentes secciones del río aguas abajo de la presa y mediante el uso de sensores remotos (fotografías aéreas, imágenes satelitales, etc.), se pueden determinar los cambios que se presenten en el cauce por ocasión de la rotura, en relación con la conformación del mismo antes del evento. El resultado será uno de los insumos para el análisis del cambio en la dinámica hidráulica del sistema aguas abajo de la presa,

consecuencia de la rotura. Los cambios en la morfología del cauce, tienen repercusiones directas en la oferta de hábitat y microhábitat para los organismos acuáticos, modificando la estructura y composición de las comunidades y por ende la productividad de los mismos.

- Régimen de inundaciones:

Mediante la realización de modelos hidrológicos, se pueden establecer cambios en el régimen de inundaciones aguas abajo de la presa, resultantes de la nueva conformación del cauce del río y de las planicies, pasado el evento de rotura de la estructura, en relación con la conformación inicial. Se emplean acá datos de batimetrías realizadas aguas abajo de la presa y el uso de sensores remotos.

El cambio en el régimen de inundaciones tiene consecuencias directas en la productividad ecológica del sistema y por ende de los servicios ambientales. Las alteraciones más importantes se relacionan con la variación en el intercambio de organismos y nutrientes entre la planicie de inundación y el río. Aspecto de fundamental relevancia lo constituye la dinámica de las especies ícticas migratorias cuyo ciclo de vida depende en gran medida de este intercambio.

El especialista en el tema evaluará la alteración en este régimen de inundaciones, que también aporta a una evaluación integral del cambio en la dinámica hidráulica del sistema como consecuencia de la rotura de la presa. El cambio en dicha dinámica se debe evaluar para determinar estrategias de mitigación y/o compensación (Véase próximo capítulo), teniendo en cuenta los resultados de los otros indicadores valorados.

- Espejo de agua (ha):

Este indicador, explicado más arriba para la valoración de la pérdida de hábitats acuáticos en planicies aluviales, también puede ser empleado para establecer la pérdida de oferta para actividades recreativas, que representa un servicio ambiental cultural para las comunidades aguas abajo de la presa. Desde el punto de vista ecológico, la alteración del espejo de agua conlleva entre otros a la alteración de la productividad primaria (fotosíntesis) y secundaria. De acuerdo con los resultados se deben determinar estrategias de mitigación y/o compensación (Véase próximo capítulo), teniendo en cuenta los resultados de los otros indicadores valorados.

Medio biótico

- Productividad pesquera:

Expresada como los kilogramos/ha.mes de acuerdo con el índice de CUEP (captura por unidad de esfuerzo pesquero) de la especie íctica evaluada (indicadora), de acuerdo con la línea base que se establezca aguas abajo de la presa, de las especies de valor ecológico, económico y cultural. Se realizará un

análisis de los cambios, en diferentes momentos pasado el evento de rotura, en comparación con la situación pre-evento.

El objetivo de este indicador es establecer una pérdida de la productividad acuática como consecuencia de la rotura de la presa; la idea de establecer especies de importancia para este análisis deriva de la posibilidad de tener un incremento en especies generalistas pero que no responden a un uso o valor ecológico o para las comunidades. Según los resultados se definirán las estrategias de mitigación y/o compensación (Véase próximo capítulo).

2. Indicadores para ecosistemas terrestres:

Medio físico

- Concentraciones de H₂S en la atmósfera:

$$IA = [H_2S]_{tn} - [H_2S]_{t0}$$

IA debe tender a cero

Donde, IA = Índice de calidad del Aire

H₂S = Gas de ácido sulfhídrico

H₂S tn = Es el valor del parámetro medido post-evento, las veces en que dicha medición se realice o como resultado de la modelación que se lleve a cabo.

H₂S t0 = Es el valor del parámetro medido en la línea base o pre-evento.

IA debe tender a cero, es decir, se espera que las condiciones antes y después del evento sean similares.

Para establecer el valor de IA incremental, se resta del valor medido post-evento o según los resultados de la modelación de calidad del aire, la concentración de H₂S que se registre en el monitoreo de línea base o pre-evento. Dentro de las campañas de monitoreo de calidad del aire (línea base o pre-evento), se pueden instalar puntos de monitoreo aguas abajo de presa, de acuerdo con los sitios establecidos según las manchas de inundación, con la finalidad de medir la presencia y concentración de gases H₂S (gas de ácido sulfhídrico).

El objetivo que se tiene con este indicador, es determinar si se presenta un aumento en las concentraciones de gas de ácido sulfhídrico, aguas abajo de la presa, que puede ocasionar malestar en las comunidades por causa del olor desagradable y que en concentraciones elevadas es un tóxico y puede producir efectos serios en la salud humana o muerte en individuos de fauna terrestre. El valor del índice debe tender a cero, ya que no deberían haber diferencias en las concentraciones antes y después del evento de rotura, o de lo contrario evaluar estrategias de mitigación y/o compensación (Véase próximo capítulo), teniendo en cuenta los resultados de los otros indicadores valorados, para que el sistema logre retornar a su estado inicial.

- Áreas desnudas (ha):

$$EL = AD_{tn} - AD_{t0}$$

EL debe tender a cero

Donde, EL = Erosión de laderas

AD tn: Es la cantidad de hectáreas presentes en el área post-evento, las veces en que dicho cálculo se realice o como resultado de la modelación que se lleve a cabo.

AD t0: Es la cantidad de hectáreas presentes en el área en la línea base o pre-evento.

EL debe tender a cero, es decir, se espera que las condiciones antes y después del evento sean similares.

Para establecer el valor de EL incremental, se restan de las hectáreas de áreas desnudas calculadas post-evento o según los resultados de la modelación de los escenarios, las hectáreas de áreas desnudas presentes aguas abajo de la presa, determinadas de línea base o pre-evento (las áreas desnudas para efectos de este indicador, corresponden a aquellas zonas desprovistas de cobertura vegetal como indicadora de su estabilidad). Mediante el uso de imágenes de satélite, fotografías aéreas u ortofotos, se establecen las hectáreas de áreas desnudas que se presentan aguas abajo de la presa, para las diferentes manchas de inundación que se establezcan.

El objetivo que se tiene con este indicador es determinar si se presenta un aumento en la cantidad de áreas desnudas aguas abajo de la presa, una vez se presente el evento, lo que muestra laderas erosionadas y que conlleva a una pérdida de hábitats y alteraciones del paisaje. El valor del índice debe tender a cero, ya que no deberían haber diferencias en las áreas desnudas antes y después del evento; en caso de presentarse un aumento de éstas, se deben evaluar estrategias de mitigación y/o compensación (Véase próximo capítulo), teniendo en cuenta los resultados de los otros indicadores valorados, para que el sistema logre retornar a su estado inicial.

- Zonas anegadas (ha):

$$AS = ZA_{tn} - ZA_{t0}$$

AS debe tender a cero

Donde, AS = Anegación del suelo

ZA tn: Es la cantidad de hectáreas presentes en el área post-evento, las veces en que dicho cálculo se realice o como resultado de la modelación que se lleve a cabo.

ZA t0: Es la cantidad de hectáreas presentes en el área en la línea base o pre-evento.

AS debe tender a cero, es decir, se espera que las condiciones antes y después del evento sean similares.

Para establecer el valor de AS incremental, se restan de las hectáreas de áreas cubiertas por agua calculadas post-evento o según los resultados de la modelación de los escenarios, las hectáreas cubiertas por agua, presentes aguas abajo de la presa, determinadas de línea base o pre-evento. Mediante el uso de imágenes de satélite, fotografías aéreas u ortofotos, se establecen las hectáreas cubiertas por agua que se presentan aguas abajo de la presa, para las diferentes manchas de inundación que se establezcan.

El objetivo que se tiene con este indicador es determinar si se presenta un aumento en la cantidad de zonas cubiertas por agua, aguas abajo de la presa, una vez se presente el evento, lo que implica que zonas normalmente secas, quedaron anegadas por causa de la inundación. El indicador mide indirectamente la afectación sobre ecosistemas terrestres con la anegación de los mismos y se complementa con el indicador de áreas de suelo por clases agrológicas (ha) El valor del índice debe tender a cero, ya que no deberían haber diferencias en las áreas cubiertas por agua antes y después del evento; en caso de presentarse un aumento de éstas, se deben determinar estrategias de mitigación y/o compensación a efectuar (Véase próximo capítulo), teniendo en cuenta los resultados de los otros indicadores valorados, para que el sistema logre retornar a su estado inicial.

- Propiedades fisicoquímicas del suelo:

De acuerdo con el tipo de uso del suelo que se presente aguas abajo de la presa, y su uso potencial, se deben establecer cuáles son las propiedades físicas o químicas del suelo que deben medirse. Así mismo, dependiendo del análisis realizado por el especialista, se determina si los resultados del cambio son negativos o positivos para el sistema y los servicios ambientales prestados.

Mediante una caracterización de los suelos del área inundada, a través de metodologías como la establecida por el IGAC para la clasificación agrológica, se pueden establecer las diferentes propiedades físicas y químicas. Esto implica caracterizaciones de suelo en campo y laboratorio, elaboración de mapas de pendientes y análisis de fotografías aéreas u otro tipo de sensores remotos.

- Calidad paisajística:

Este indicador está asociado a la afectación a los servicios ambientales que presta el área en general y también incorpora dentro de sus variables, la presencia de ecosistemas acuáticos.

Actualmente existen modelos a través de los cuales se puede establecer una valoración de la visibilidad, la fragilidad del paisaje y la calidad paisajística. Algunos de estos permiten el uso de herramientas como ArcGis, que facilitan la cuantificación de las variables y atributos necesarios para los modelos. Para llevar a cabo este análisis se requiere de imágenes de satélite, radar o fotografías aéreas del área de inundación definida en los diferentes escenarios.

Este análisis debe llevarse a cabo para la zona antes del evento (línea base o pre-evento) y para las modelaciones que se realicen dentro del análisis de riesgos o post-evento de rotura y permitirá establecer la pérdida de calidad paisajística, de acuerdo con el análisis que realice el especialista. Con la valoración resultante se determinarán estrategias de mitigación y/o compensación (Véase próximo capítulo).

- Áreas de suelo por clases agrológicas (ha):

De acuerdo con la caracterización agrológica (explicada en el indicador de alteración de las propiedades fisicoquímicas del suelo) y el análisis geomorfológico (a través del uso de sensores remotos) que se realice para la zona aguas abajo de la presa, se establecerá la alteración de los suelos lo que conlleva a una afectación de las actividades agropecuarias por la variación en el potencial agrológico; así mismo, esta alteración implica la afectación sobre los ecosistemas terrestres por el cambio de los suelos, ya que la presencia de algunas sustancias imposibilita el crecimiento de la vegetación o causa su debilitamiento y, porque la composición y características de los suelos limitan o favorecen la presencia de coberturas vegetales.

Como los análisis se realizan en varios momentos post-evento o para varios escenarios, se podrá determinar la necesidad de implementar estrategias de mitigación para restablecer o mantener el uso potencial del suelo, según lo identificado por el especialista.

- Productividad agropecuaria:

Expresada como los kilogramos/ha.mes de la actividad evaluada, de acuerdo con la línea base que se establezca aguas abajo de la presa, de las actividades agrícolas o pecuarias que se presenten. Se realizará un análisis de los cambios, en diferentes momentos pasado el evento de rotura, en comparación con la situación pre-evento.

El objetivo es determinar una potencial pérdida de productividad de actividades agrícolas o pecuarias que se presentan en la zona aguas abajo de la presa, entendido como un servicio ambiental (producción). Según los resultados se definirán las estrategias de mitigación y/o compensación (Véase próximo capítulo).

Medio biótico

- Cobertura vegetal (ha):

Mediante el uso de imágenes de satélite u otro sensor remoto, se establece la transformación de las diferentes coberturas vegetales (por hectárea) que se presentan aguas abajo de la presa y su distribución pasado el evento, con relación a las coberturas iniciales (línea base).

El objetivo que se tiene con este indicador es determinar si se presenta una pérdida de coberturas naturales, aguas abajo de la presa, una vez se presente el evento, lo que implica la pérdida de vegetación y fauna asociada, así como de hábitats. Es importante que este análisis se realice en varios momentos post-evento o a través de modelos), y de acuerdo con los resultados, se deben evaluar estrategias de mitigación y/o compensación (Véase próximo capítulo), teniendo en cuenta los resultados de los otros indicadores valorados.

- Calidad y cantidad de hábitats:

$$CCH = (HaCN * 3(DCN))t_0 - (HaCN * F(DCN))t_n$$

CCH debe tender a cero

Donde, CCH = Calidad y cantidad de hábitats

HaCN = Hectáreas de cada cobertura natural registrada

DCN = Diversidad de la cobertura natural evaluada

F = Factor. En t_n se tendrá un factor de 1 si CN es menor al 50%, 2 si está entre el 50 y 85% y 3 si es mayor al 85%, en relación con CN en el tiempo 0.

t_n : en el post-evento, las veces en que dicho cálculo se realice o como resultado de la modelación que se lleve a cabo.

t_0 : estado inicial (línea base o pre-evento).

AS debe tender a cero, es decir, se espera que las condiciones antes y después del evento sean similares.

Para establecer el valor de CCH incremental, se resta del valor resultante para las diferentes coberturas naturales presentes aguas abajo de la presa, determinadas de línea base o pre-evento, el resultado después del evento en los diferentes momentos analizados o para las distintas modelaciones que se realicen. Mediante el uso de imágenes de satélite, fotografías aéreas u otros sensores remotos, se establecen las hectáreas de cada cobertura vegetal; para la biodiversidad se pueden emplear diferentes índices que requieren evaluaciones ecológicas rápidas, para lo cual se deben establecer los sitios de muestreo para las diferentes manchas de inundación que se establezcan.

El objetivo que se tiene con este indicador es determinar si se presenta una pérdida en la cantidad y calidad de hábitats aguas abajo de la presa, una vez se presente el evento. El valor del índice debe tender a cero, lo que representaría un retorno a las condiciones iniciales; en caso de presentarse dicha transformación, se establecerán estrategias de mitigación y/o compensación (Véase próximo capítulo), teniendo en cuenta los resultados de los otros indicadores valorados, para que el sistema logre retornar a su estado inicial. Los análisis deben realizarse para diferentes momentos (ya sea post-evento o para diferentes modelaciones), dado que al inicio puede presentarse un incremento de especies pioneras que aumentan la diversidad pero que no implica un equilibrio en el sistema.

- Poblaciones de fauna:

Mediante la realización de Evaluaciones Ecológicas Rápidas, se pueden establecer las poblaciones de fauna presentes aguas abajo de la presa, una vez pasado el evento de rotura de la presa, en diferentes momentos, para especies indicadoras que hayan sido definidas por el especialista previamente, por unidad de área y para diferentes coberturas, en relación con las poblaciones presentes antes del evento.

El objetivo de este indicador es establecer la alteración de poblaciones de fauna como consecuencia de la rotura de la presa. De acuerdo con los resultados de éste y otros indicadores, se deben establecer las estrategias de mitigación y/o compensación a implementar después de un evento de rotura (Véase el próximo capítulo).

- Poblaciones de flora:

Mediante la realización de Evaluaciones Ecológicas Rápidas, se pueden establecer las poblaciones de flora presentes aguas abajo de la presa, pasado el evento de rotura de la presa (en diferentes momentos), para especies indicadoras que hayan sido definidas por el especialista previamente, por unidad de área y para diferentes coberturas, en relación con las poblaciones presentes antes del evento.

El objetivo de este indicador es establecer la disminución de poblaciones de flora como consecuencia de la rotura de la presa. De acuerdo con los resultados de éste y otros indicadores, se deben establecer las estrategias de mitigación y/o compensación a implementar después de un evento de rotura (Véase el próximo capítulo).

- Fragmentación:

Este indicador permite analizar la alteración de la estructura ecológica del paisaje, el cual también incorpora la pérdida de conectividad. Este análisis se realiza para el sector aguas abajo de la presa, antes y después del evento de rotura, mediante la utilización de sensores remotos y herramientas cartográficas como ArcGis, que faciliten el cálculo de variables como el número, tamaño y forma de los parches, así como el aislamiento entre los mismos.

Se requiere de un análisis por parte del especialista, para establecer el índice de fragmentación como un grado de agregación espacial de las manchas de hábitat en el área de estudio, y de la conectividad, basada en la funcionalidad del territorio en relación con la capacidad de movimiento de los organismos a través de los distintos usos del suelo (Vicente, 2003).

De acuerdo con los resultados del análisis de la fragmentación y conectividad aguas abajo de la presa, se establecerán las estrategias de mitigación y/o

compensación propicias, teniendo en cuenta los demás indicadores evaluados (Véase próximo capítulo).

- **Uso flora:**

Expresada como los kilogramos/ha.mes de la especie de flora evaluada, de acuerdo con la línea base que se establezca aguas abajo de la presa, de las especies de flora, leña, madera, frutos, etc. de valor económico y cultural. Se realizará un análisis de los cambios, en diferentes momentos pasado el evento de rotura, en comparación con la situación pre-evento.

El objetivo de este indicador es determinar una pérdida en la productividad ecosistémica terrestre, medida a través del uso que las comunidades le dan a la flora. Según los resultados se definirán las estrategias de mitigación y/o compensación a efectuar (Véase próximo capítulo).

- **Diversidad Alfa y Beta:**

Se debe realizar una comparación de la diversidad alfa (relacionada con la riqueza de especies dentro de una comunidad) y de la diversidad beta (cambios o reemplazo en la composición de especies), para flora y fauna, antes y después del evento de rotura de la presa. Para realizar este análisis se emplean los datos de los indicadores de cobertura vegetal y las evaluaciones ecológicas rápidas realizadas para las poblaciones de fauna y de flora.

El objetivo de este indicador es establecer una alteración de la biodiversidad en la condición pre-evento (línea base) y post-evento. Para este último, se deben realizar los análisis en diferentes momentos, ya que como ya se ha explicado, puede presentarse el establecimiento de especies pioneras que aumentan la diversidad pero no implica un equilibrio en el sistema.

De acuerdo con el resultado del análisis de este indicador y una evaluación integral con los demás, se definirán las estrategias de mitigación y/o compensación pertinentes (Véase el próximo capítulo).

Como se ha manifestado a lo largo del presente capítulo, cada una de las mediciones o análisis deben llevarse a cabo en el evento sin rotura (línea base) y con rotura (post-evento), para así determinar las diferencias resultantes en cada uno de los indicadores y para varios momentos pasado el evento. Mediante un análisis integral de los indicadores físicos y bióticos se pueden establecer estrategias de mitigación o compensación para las diferentes consecuencias ambientales que se establezcan para el caso de análisis (Véase capítulo 7).

7 ESTRATEGIAS DE MANEJO DE CONSECUENCIAS AMBIENTALES POR LA FALLA O ROTURA DE UNA PRESA

Dentro del esquema de la gestión de riesgo en presas (Véase capítulo 4), se cuenta con un paso en el que se busca controlar el riesgo para:

1. Minimizar la posibilidad de falla o rotura de la presa.
2. Reducir el riesgo a través de una vigilancia continua del estado de la presa y de la implementación de un Plan de emergencia o Contingencia.
3. Reevaluar periódicamente la verificación del estado del arte.

Para el primer caso, actualmente a nivel mundial, incluyendo Colombia, la selección de las medidas para minimizar la posibilidad de que ocurra el evento de falla o rotura y la estrategia para su implementación tienen como cimiento básico la aplicación del principio ALARP (*“as low as reasonably practicable”*²), suponiendo que no es posible reducir al cero absoluto los riesgos, por la limitación de recursos. Este principio asegura la obligación legal de llevar dicha reducción hasta un nivel “tan bajo como razonablemente sea factible”, es decir, a un punto en el que cualquier reducción adicional de riesgo implique un coste desproporcionado en relación con el beneficio o reducción lograda (Membrillera M. , 2007).

En este punto se busca en la fase de diseño cumplir con la normativa vigente en cada país y las recomendaciones ingenieriles a nivel mundial, que establecen criterios de diseño dentro de los que se encuentran los relacionados con la seguridad hidrológica, sísmica y estructural, así como la necesidad de implementar sistemas de auscultación (revisión). Dentro del análisis de riesgos realizado para una presa, una vez evaluado el riesgo, se procede a identificar medidas que para reducir el riesgo, simular las opciones e implementar aquellas que permitan que el riesgo sea tolerable (Véase Figura 7-1). Esto es muy útil en la fase de diseño porque pueden considerarse desde ese momento, parámetros estructurales, de altura, materiales, obras anexas, etc., que favorezcan esa disminución del riesgo.

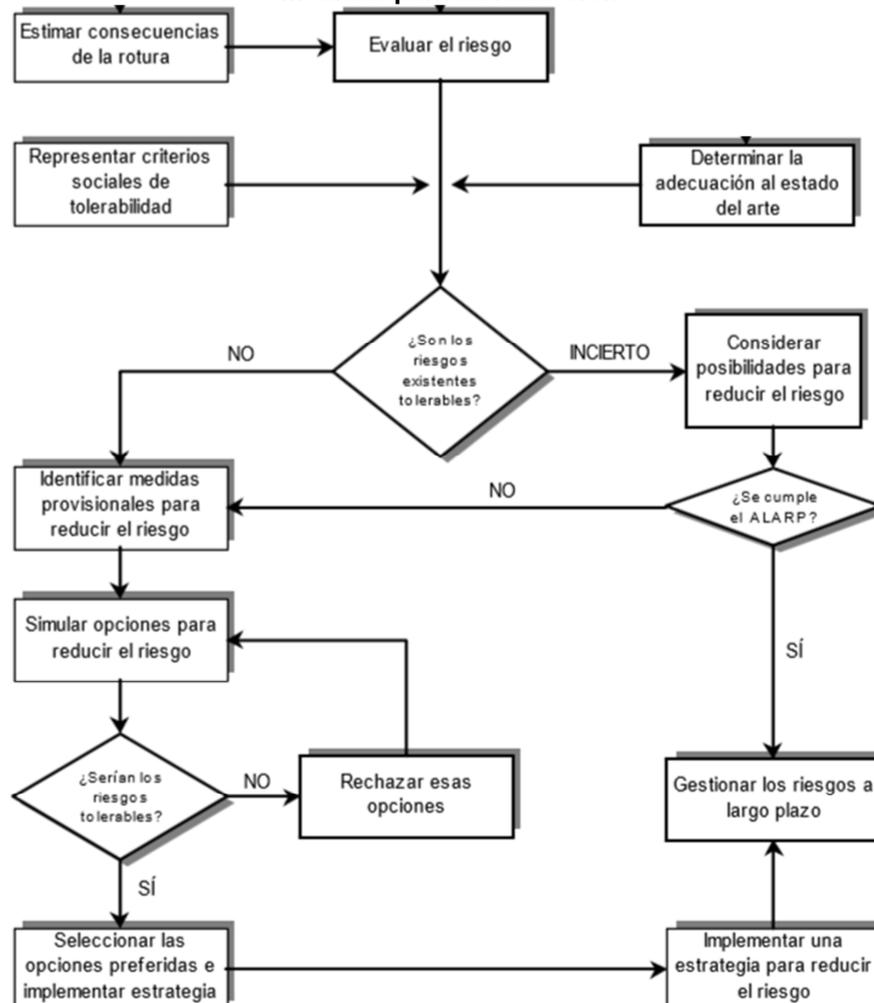
Durante la construcción, se requiere garantizar que el constructor cuente con una experiencia probada en este tipo de obras que permita alcanzar los estándares de calidad especificados para los trabajos, una continua supervisión de los trabajos y un continuo apoyo técnico de los diseñadores, llevar a cabo ensayos de materiales de construcción y prospección de las condiciones de fundación de las estructuras, inspeccionar la instalación de cada uno de los instrumentos e instalaciones complementarias, controles durante el primer llenado del embalse, entre otros.

Durante la etapa de operación, se recomienda seguir un Manual de Operación y Mantenimiento elaborado para la presa como el propuesto por la Autoridad Nacional

² Principio utilizado como criterio social de aceptación, por el que los riesgos menores que un umbral máximo de tolerabilidad se asumen únicamente si su reducción resulta impracticable o si el coste necesario para ello es desproporcionado en comparación con la mejora de seguridad alcanzada (Membrillera M. , 2007).

de los Servicios Públicos - ASEP (2010), aunque en Colombia no es clara la regulación normativa del tema (Véase capítulo 2).

Figura 7-1. Determinación de la tolerabilidad de los riesgos y determinación de medidas para su reducción



Fuente: ANCOLD, En: Membrillera *et.al.* (2005).

Ya en el caso específico de vigilancia y planes de emergencia, le corresponde a cada concesionario u operador tener su propio plan de contingencia para todas las posibles amenazas de acuerdo con el análisis de riesgos (dentro de este análisis se debe incluir el riesgo por la falla o rotura de presa), tal como lo establecen los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para la construcción de presas, represas o embalses del MAVDT (2006) dentro del capítulo Plan de Contingencia. Durante la fase de operación de la presa, el concesionario u operador debe hacer el mantenimiento de las obras y realizar las respectivas inspecciones en pro de garantizar el buen funcionamiento de la misma; así mismo,

debe dar cumplimiento a la normatividad vigente y al Plan de Manejo Ambiental aprobado mediante la Licencia Ambiental del proyecto.

El Plan de Emergencia o Contingencia es elaborado para cada presa en particular y para cada una de las fases del proyecto, como ya se indicó. Como se presentó en el capítulo 2 (Normatividad), en Colombia no existe información específica sobre Planes de Contingencia por rotura de presa; sin embargo, para presas en España por ejemplo, se cuenta con la Guía técnica para la elaboración de los Planes de Emergencia de Presas, la cual se puede consultar para mayor detalle (Ministerio de Medio Ambiente, 2001)).

Entrando a lo que es el Plan de Contingencia, este incluye la estructura de la organización que atenderá las diferentes emergencias que se hayan determinado, así como sus responsabilidades y roles. Igualmente se describe el procedimiento a efectuar ante la situación contingente, dentro del que se incluyen los manejos post-evento, es decir, el manejo de las consecuencias.

Ante un evento de falla o rotura de presa, a nivel general se requiere disponer de un sistema de alerta para advertir de la inminencia del mismo a las comunidades aguas abajo de la presa que puedan ser afectadas por el evento y realizar evacuaciones de las personas en riesgo (INGETEC - ISAGEN, 2008).

Debido a que las consecuencias socioeconómicas han sido normalmente valoradas en términos monetarios, los manejos post-evento se traducen en medidas de tipo compensatorio o mitigatorio. En caso de presentarse afectación a infraestructura, actividades agropecuarias o comerciales y por la afectación del recurso hídrico, y de acuerdo con el análisis de consecuencias realizado el cual determina el coste incremental, se pueden llevar a cabo acciones de restablecimiento o indemnización. De igual manera, se determinará la reconstrucción de la presa, toda vez que los costos sean considerables para el dueño y/o para la prestación del servicio dado por la presa y el embalse.

En el caso extraordinario de presentarse pérdida de vidas, se deberán definir las indemnizaciones a que haya a lugar y el apoyo a las familias afectadas.

Tal como se ha manifestado a lo largo del presente trabajo de grado, normalmente no se han incluido dentro del análisis de riesgos, las consecuencias ambientales (físicas y bióticas), razón por la cual no se cuenta con información para establecer estrategias para el manejo de las mismas.

Por lo anterior, se describen a continuación posibles estrategias de manejo de las consecuencias ambientales físicas y bióticas (presentadas en el Anexo 3), establecidas a partir del caso de estudio empleado para la determinación de dichas consecuencias (capítulos 5 y 6) y que pueden ser del tipo preventivo, mitigatorio o de compensación. Para la determinación de las estrategias en cada caso específico evaluado, se requiere de un análisis interdisciplinario de los resultados de cada uno de los indicadores, que permita identificar los casos críticos, las zonas que por su capacidad de carga requieran intervenciones o simplemente aislamiento, las

prioridades de intervención, etc., tanto para los ecosistemas acuáticos como los terrestres.

Como estos indicadores se encuentran desagregados de acuerdo con el tipo de impacto que permiten evaluar, las medidas pueden ser establecidas en diferentes puntos de la cadena (Véase Anexo 3) y realizar manejos puntuales o integrales, y así determinar en cada instancia, cual es el más apropiado de acuerdo con el resultado del evento:

1. Medidas preventivas:

Corresponden a aquellas que se realizan antes (de ser posible) o inmediatamente antes que se produzca el evento. Buscan resguardar del evento o de las consecuencias previsibles del mismo, ecosistemas estratégicos, sectores estratégicos o dinámicas estratégicas de las que dependen en gran medida los grupos de ecosistemas o las poblaciones, por los servicios ambientales que prestan y que podrían en principio denominarse como “claves”.

Dentro de las medidas preventivas para los ecosistemas acuáticos, para el caso de estudio, puede encontrarse el aislamiento de los sistemas cenagosos que tienen relación directa con el río y del que dependen no solamente las poblaciones humanas del sector, sino poblaciones de fauna (acuática y aves principalmente).

Particularmente, para el caso de estudio del proyecto Hidrosogamoso, la ciénaga el Llanito es el sustento de la población del mismo nombre; de esta ciénaga también depende en gran medida la productividad pesquera del río Sogamoso y durante la temporada de verano, es el principal refugio de aves del área. Aislar la ciénaga del ingreso de volúmenes importantes de lodos podría ser una medida preventiva.

Otras medidas preventivas surgen del manejo en el vaso del embalse que permite evitar la concentración de sustancias tóxicas en el agua y en los sedimentos así como excesos de materia orgánica e inorgánica y de nutrientes, lo que disminuye la afectación por estos elementos, en el caso de un evento de rotura que ocasione el desembalse.

2. Medidas correctivas o mitigatorias

Corresponde a aquellas que buscan mitigar el impacto ocasionado por el desastre. Pueden dividirse en:

- Limpieza: recuperación de áreas mediante la remoción de desechos, escombros, etc. Desde el punto de vista de lo que ocupa el presente trabajo de grado, corresponde a manejos relacionados con el restablecimiento en lo posible, de algunas dinámicas claves: limpieza de los canales de acceso a ciénagas; limpieza de zonas con vegetación riparia de material que puede colocar en riesgo la estabilidad; conformación de drenajes artificiales para desecación de áreas de importancia (como hábitat o para actividades productivas) y que se favorezca la reducción de zonas anegadas; entre otras.

- **Recuperación:** son medidas que se establecen de forma posterior a las anteriores y que buscan restablecer servicios ecosistémicos. Dentro del caso del proyecto Hidrosogamoso por ejemplo, se tiene: dragado de zonas inundables consideradas claves, de tal forma que se restablezca la comunicación con el río y se recupere su productividad y espejo de agua; dragados en el cauce que permitan recobrar la dinámica hidráulica del río, en zonas que se considere no podrá haber una reconformación del cauce por el propio sistema; incorporación de individuos de especies promotoras o estimuladoras de sucesiones (recuperación) posteriores; reconformación de taludes y siembra de vegetación ribereña; restablecimiento de las características fisicoquímicas del suelo de acuerdo con el uso potencial y actual establecido en la línea base; traslado de fauna a las zonas cercanas que presenten características similares; disminución de la DBO o DQO mediante tratamientos fisicoquímicos o biológicos; utilización de sistemas de desulfuración del aire.

Dentro de los sitios relevantes para proteger y/o recuperar de forma prioritaria, se encuentran además de la ciénaga el Llanito (zonas inundables importantes por la productividad pesquera), el sector trezado del río Sogamoso (sector medio entre la presa y la desembocadura del río Magdalena). El sector trezado del río Sogamoso presenta microambientes conformados por brazos y zonas de remanso que tienen condiciones propicias para la reproducción y aún para el desarrollo. Esta zona es importante para la reproducción del bocachico que es la especie migratoria trascendental para las pesquerías y que es importante en términos de productividad ecológica.

El ciclo completo en el río Sogamoso aguas abajo de la presa es: sector trezado (zona de desove y parcialmente de desarrollo de especies migratorias) y ciénaga el Llanito (zona de desarrollo de estas mismas especies y la de mayor productividad).

3. Medidas de compensación:

Orientadas a sustituir servicios ambientales claves (de subsistencia) hasta que el sistema recupere su productividad. Dentro de los más notorios se encuentra:

- **Pesca:** La compensación tomando como ejemplo la ciénaga el Llanito, consiste en el subsidio para el desplazamiento de la población de pescadores a otros sectores en donde puedan desarrollar su actividad (ejemplo río Magdalena).
- **Uso Flora:** Siembra de especies de flora a los que la comunidad les da uso; mientras se logra contar con individuos de un porte considerable para que puedan brindar el uso, se requiere de un subsidio a las comunidades o la consecución del material en zonas aledañas.
- **Diversidad:** Enriquecimiento florístico y de hábitats en zonas próximas al área de inundación que permitan el establecimiento de especies de flora y fauna, favorezcan la conectividad y disminuyan la fragmentación.

De acuerdo con la metodología general de análisis de riesgos, cada presa se trata como un caso en particular y requiere evaluaciones específicas, si bien la

información puede ser insumo para los análisis de otros casos. Esto también puede observarse a través de todo el documento, en relación con la estimación de consecuencias ambientales (físicas y bióticas), que tal como se presentó en diferentes capítulos, requiere de una evaluación integral de los resultados de los indicadores propuestos, por parte de diferentes especialistas, con miras a determinar las estrategias puntuales o integrales a desarrollar por ocasión de un evento de rotura de una presa.

Finalmente, se requiere de un monitoreo constante de la presa, de la información de la misma y de una revisión del análisis de riesgos, que permita detectar una posibilidad de mejora o acciones inmediatas o a mediano a implementar, para reducir la probabilidad de ocurrencia del evento.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En Colombia existen más de 130 presas, dentro de las que se encuentran pequeñas y grandes, estas últimas casi siempre con un embalse asociado, lo que puede ocasionar mayores consecuencias ante un evento de rotura que ocasione un desembalse.
- Desde la década de los 90's, se han desarrollado en el país una serie de normativas relacionadas con la gestión del riesgo de desastres; sin embargo, para el caso específico del análisis de riesgos en presas y el establecimiento de consecuencias asociadas a dicho evento, el desarrollo es casi nulo, lo que dificulta la incorporación de estos análisis.
- A nivel mundial, se han presentado más de 35 casos de rotura de presas, la mayoría construidas en tierra y por problemas generalmente asociados a construcciones que no cumplieron con los parámetros de diseño o los estándares de calidad de los materiales o procedimientos, cálculos hidrológicos inexactos, falta de mantenimiento o errores humanos en la operación.
- Dentro de la Gestión del Riesgo se tienen dos actividades macro: la Declaración del Riesgo y el Control del mismo. Dentro del primero se desarrollan las actividades de Análisis y de Evaluación Riesgo, mientras que el segundo involucra soluciones desde el diseño y construcción para minimizar el riesgo, Planes de emergencia o Contingencia y evaluación de la presa y de las medidas definidas.
- El Análisis de Riesgo permite estimar el riesgo que sobre personas, propiedades o medio ambiente puede tener un evento, en este caso, el de rotura de una presa. Se cuenta actualmente con un esquema que permite desarrollar el análisis paso a paso y que tiene en cuenta desde la determinación del alcance del estudio, identificación de modos de fallo, análisis de amenazas, probabilidades y consecuencias y el cálculo del riesgo.
- Dentro de la estimación de consecuencias, a través del tiempo se ha realizado una detallada evaluación de las que afectan los componentes sociales y económicos, con diferentes metodologías que permiten su valoración en términos incluso monetarios; sin embargo, las consecuencias ambientales (físicas y bióticas) no han sido realmente consideradas.
- Para la determinación de las consecuencias ambientales se requiere de un estudio de la zona aguas abajo de la presa que permita establecer una línea base del sistema y los elementos que se encuentran expuestos al riesgo por el evento de rotura de la presa.

- Con miras a realizar una valoración de las consecuencias ambientales, se determinan una serie de indicadores que permiten evaluar los diferentes impactos sobre los ecosistemas acuáticos y terrestres. Para determinar los valores incrementales de las consecuencias, los indicadores requieren de datos iniciales (línea base) que serán comparados con los resultados de las mediciones, muestreos o monitoreos realizados post-evento.
- La mayor premisa, dentro de la gestión del riesgo, es minimizar éste al máximo y llevarlo a niveles tolerables. Por esta razón, lo primero que debe buscarse es que desde el diseño, la falla o rotura de la presa sea un evento casi improbable. Sin embargo, dada la posibilidad del suceso, porque puede estar asociado a un caso antrópico, se debe establecer un Plan de Contingencia que incluya señales de alarma, evacuación, responsables, roles y medidas de manejo (prevención, mitigación o corrección y compensación).
- Para los componentes socioeconómicos, dada la posibilidad de expresarlo en términos de costos, regularmente se llevan a cabo indemnizaciones o reposiciones. En el caso de los componentes fisicobióticos, se requiere de un análisis multidisciplinario e integral de los resultados de la evaluación a través de los indicadores, que permita determinar las medidas a implementar tanto a nivel puntual como ecosistémico.
- Debido a que cada proyecto debe tener su propio Análisis de Riesgos, Plan de Contingencia y Plan de Mantenimiento para la presa, se requiere que cada operador o concesionario realice su propia evaluación que permita determinar si es susceptible de algún daño o falla que pueda ocasionar un rompimiento de la presa y establecer las medidas que minimicen al máximo el riesgo de este evento y que se incluya dentro del Plan de Contingencia, el análisis de riesgos por una eventual falla o rotura de presa, incorporando las consecuencias ambientales.
- Es necesario realizar estudios de las zonas aguas abajo de las presas, que permitan contar con una línea base que facilite el análisis de las consecuencias ambientales por falla o rotura de ellas.

REFERENCIAS

- Alcrudoa, F. &. (2007). Description of the Tous Dam break case study. *Journal of Hydraulic Research. Volume 45, Supplement 1.*, 45-57.
- Australian National Committee on Large Dams Inc. - ANCOLD. (2000). *Guidelines on assessment of consequences of dam failure*. Australia: ANCOLD.
- Autoridad Nacional de los Servicios Públicos - ASEP. (2010). *Normas para la seguridad de Presas República de Panamá*. Panamá.
- Banco Mundial. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*. Bogotá: Banco Mundial.
- Banco Mundial. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas*. Bogotá: Banco Mundial.
- Bellier, J. (1967). *Le barrage de Malpasset*. Retrieved Septiembre 26, 2003, from http://www.ecolo.org/documents/documents_in_french/malpasset/malpasset.htm
- BID. (2007). *Información para la gestión del riesgo de desastres estudios de caso de cinco países: Estudio de caso Colombia*. BID.
- Board, F. I. (1977, Diciembre 21). *Report of Failure of Kelly Barnes Dam Flood and Findings - History*. Retrieved Septiembre 28, 2013, from <http://ga.water.usgs.gov/publications/ToccoaFIBReport/body1.html>
- Bolton, H. a. (2011, 04 18). The Failure of Teton Dam. *Engineering Geology*, 173-205.
- CAR - Gomez, C. y. (1980). *Informe mensual de progreso No. 1: Ensayo de comportamiento de la presa del Sisga*. Bogotá: CAR.
- CEPAL - Sistema de las Naciones Unidas en Argentina. (2003). *Evaluación del impacto de las inundaciones y el desbordamiento del río Salado en la provincia de Santa Fe, República de Argentina en 2003*. Argentina: CEPAL.
- Chanson, H. (2009). Application of the Method of Characteristics to the Dam Break Wave Problem. *Journal of Hydraulic Research*, 41-49.
- Comisión de normas para grandes presas. (1967). *Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de grandes presas*. España.
- Comisión de normas para grandes presas. (1996). *Reglamento técnico sobre seguridad de presas y embalses*. España.
- Comité Nacional Español de Grandes Presas. (1997). *Guías técnicas de seguridad de presas No. 4: Avenida de proyecto*. Madrid.
- Comité Nacional Español de Grandes Presas. (2002). *Análisis y Aplicación del Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses: Elección de la tipología y altura de presa en función del riesgo potencial*. Zaragoza.
- Consorcio Generación Ituango - EPM. (2011). *Actualización Estudio de Impacto Ambiental - Plan de Contingencia*. Medellín.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. (1975). *Presa y Embalse del Neusa : breve descripción general*. Bogotá: CAR.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. (1984). *Estudios Técnicos S.A. Ingenieros Consultores. Estudio de factibilidad y diseño presa El Hato y distrito de riego: Informe final*. Bogotá: CAR.
- COSUDE. (2002). *Instrumentos de apoyo para el análisis y la gestión de riesgos naturales: Guía para el especialista*. Managua: COSUDE.

- Digital, R. d. (2011, Junio 23). *La rotura del pantano de Puentes. La causa de la tragedia (en español)*. Retrieved Septiembre 23, 2013, from http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,373,m,1096&r=ReP-16670-DETALLE_REPORTAJESPADRE
- EMGESA. (2013). *Plan de Manejo Ambiental del Embalse de Tominé*.
- EMGESA. (2013, Septiembre 7). *Sitio oficial EMGESA* . Retrieved Septiembre 7, 2013, from <http://www.emgesa.com.co/>
- Empresa de Energía de Bogotá - EEEB. (1993). *Estudio general del embalse del Muña*. Bogotá: EEEB.
- Empresas Públicas de Medellín - EPM. (2008). *Ingeniería de Presas en Empresas Públicas de Medellín*. Medellín: EPM.
- Environment News Service. (2006, Junio 29). Giant cracks appear in new Brazilian dam. *Environment News Service*.
- EPM. (2013, Septiembre 8). *Sitio Oficial EPM*. Retrieved Septiembre 8, 2013, from <https://www.epm.com.co/>
- EPSA. (2013, Septiembre 9). *Sitio Oficial EPSA*. Retrieved Septiembre 9, 2013, from <http://www.epsa.com.co/>
- Farooq, R. (2013, Junio 2013). *Top 15 Worst Dam Disasters Ever*. Retrieved Septiembre 25, 2013, from <http://chillopedia.com/interesting/top-15-worst-dam-disasters-ever/>
- Fondo de Prevención y atención de Emergencias - FOPAE. (2012). *Metodologías de análisis de riesgo documento soporte guía para elaborar planes de emergencia y contingencias*. Bogotá: FOPAE.
- Grosso, J. (2004). *Programa de mantenimiento basado en RCM para los hidrogenadores de la Central La Guaca. Tesis Especialización en Gerencia de mantenimiento*. Bucaramanga: Facultad de Ingenierías físico mecánicas, Universidad Industrial de Santander.
- INGETEC - EMGESA. (2008). *Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo: capítulo Plan de Contingencia*. Bogotá.
- INGETEC - ISAGEN. (1996). *Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Hidroeléctrico del río Sogamoso*. Bogotá: ISAGEN.
- INGETEC - ISAGEN. (2008). *Actualización del Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Hidroeléctrico Sogamoso: capítulo Plan de Contingencia*. Bogotá.
- INGETEC. (2013, Septiembre 5). *Sitio Oficial INGETEC*. Retrieved Septiembre 5, 2013, from <http://www.ingetec.com.co/>
- ISAGEN. (2013, Septiembre 6). *Sitio Oficial ISAGEN*. Retrieved Septiembre 6, 2013, from <http://www.isagen.com.co/>
- ItalianWikipedia. (2013). *List of wars and disasters by death toll: Flood disasters*. Retrieved Septiembre 25, 2013, from http://en.wikipedia.org/wiki/Val_di_Stava_dam_collapse
- Keller, K. (2004). *Rocky Mountain National Park Geologic Resource Evaluation Report, National Park Service Geologic Resources Division*. USA: Sid Covington.
- Lera, J. (1999, Enero 10). «40 años de la tragedia de Ribadelago, en la que murieron 144 personas» (en castellano). *El País*. Retrieved Septiembre 26, 2013, from http://elpais.com/diario/1999/01/10/espana/915922818_850215.html

- Marengo, M. (1994). *Marengo M., H., Análisis de riesgo de falla en presas de tierra y enrocamiento ante avenidas - Tesis Doctoral*. México D.F.: Facultad de Ingeniería de la UNAM.
- MAVDT. (2010). *Metodología general para la presentación de estudios ambientales*. Bogotá: MAVDT.
- MAVDT, DNP y Agencia Colombiana de Cooperación Internacional. (2005). *Guía ambiental para evitar, corregir y compensar los impactos de las acciones de reducción y prevención de riesgos en el nivel municipal*. Bogotá.
- McGrath, S. (2000). *To Study International Practice and Use of Risk Assessment in Dam Management*. Australia: The Winston Churchill Memorial Trust of Australia.
- MEMA. (2004, Marzo 22). Governor Barbour requests federal assistance. *News release*.
- Membrillera, M. (2007). *Contribución a la aplicación del análisis y declaración de riesgos en presas españolas, incluyendo priorización de inversiones. Tesis Doctoral*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Membrillera, M., Escuder, I., González, J., & Altarejos, L. (2005). *Aplicación del Análisis de Riesgos a la Seguridad de Presas*. Valencia: Editorial UPV.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2005). *Guía No. 1 Guía Metodológica para Incorporar la Prevención y la Reducción de Riesgos en los Procesos de Ordenamiento Territorial*. Bogotá: Dirección Territorial - MAVDT.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2006). Términos de referencia para la elaboración del E.I.A., para la construcción de presas, represas o embalses con capacidad mayor de 200 millones de metros cúbicos de agua. PR-TER-1-01.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2006). Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental para la construcción y operación de centrales hidroeléctricas generadoras. HE-TER-1-01.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2010). *Metodología general para la presentación de estudios ambientales*. Bogotá: MAVDT.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2010). *Metodología general para la presentación de estudios ambientales*. Bogotá: MAVDT.
- Ministerio de Comercio. (2013). *Descripción del Sistema Eléctrico Colombiano*.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2001). *Guía técnica para la elaboración de los planes de emergencia de presas*. España: MMA.
- Mol, H. M. (2007). The fish fauna of Brokopondo Reservoir, Suriname, during 40 years of impoundment. *Neotropical Ichthyology*, 351-368.
- Norwegian Technology Standards Institution. (1998). *Risk and emergency preparedness analysis*. Oslo.
- Osnos, E. (2011, Octubre 12). *Faust, China, and Nuclear Power*. *The New Yorker*. Retrieved Septiembre 28, 2013, from <http://www.newyorker.com/online/blogs/evanosnos/2011/10/faust-china-and-nuclear-power.html>
- Ramírez, A. (2011). *Distribución espacial y estructura de la comunidad de peces en tres segmentos del río Sogamoso y su relación con los cambios en el caudal*

- ocasionados por las épocas de lluvia y sequía. Tesis de Maestría. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Robinson, J. W. (2013, Enero 26). *Buffalo Creek 'miracle baby' tells story to Reader's Digest*. Retrieved Septiembre 27, 2013, from <http://www.wvgazette.com/Life/201301250244>
- Rocha, A. (2009). *La morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales*. Lima: VIII CONGRESO INTERNACIONAL OBRAS DE INFRAESTRUCTURA VIAL.
- S.A. (1999). *Aspectos hidrometeorológicos para la determinación de riesgos en presas y embalses: Planes de contingencia. Seminario Taller Binacional sobre Control y manejo de inundaciones*. San Cristobal.
- S.A. (2013). *St. Francis Dam disaster. Office of Historical Preservation, California State Parks*. Retrieved Septiembre 25, 2013, from <http://ohp.parks.ca.gov/ListedResources/Detail.aspx?num=919>
- Sedano, R. (2012). *Gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia - Tesis de Maestría*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Serrano, A. (2011). *Desarrollo de una herramienta completa de análisis y evaluación de riesgos en seguridad de presas - Tesis de Doctorado*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Sierra, F. S. (2011). Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica. *Informador Técnico (Colombia)*. Edición 75., 73-85.
- Society, R. (1997, Julio 2). Opuha dam reconstruction could be delayed. *Science in the News*.
- SPANCOLD, P. A. (2013). *Technical guides on dam safety - Technical guide on operation of dams and reservoirs Volume 1: risk analysis applied to management of dam safety*. España.
- Triana, E. (2007). *Estimación de Consecuencias de Fallo y Rotura de Presas en el Contexto del Análisis de Riesgos. Tesis Doctoral*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2007). *Portafolio de proyectos de generación de energía*. Bogotá: UPME.
- Usa Today. (2005, Noviembre 2). 54 dead, hundreds missing after dam burst in Pakistan. *Usa Today*.
- Vajont. (1963, Octubre 9). *Cronaca di una Catastrofe*. Retrieved Septiembre 27, 2013, from <http://WWW.GIORNALELAVOCE.IT>
- Vicente, M. G. (2003). *ndices de fragmentación y conectividad para el Indicador de biodiversidad y paisaje de la Comunidad Autónoma del País Vasco*. País Vasco: Dirección de Biodiversidad - Gobierno Vasco.
- Vidal, L. F. (2010). *Servicios Ecosistémicos - Bases conceptuales*. Bogotá: Fundación Natura.
- Vogel, A. (2002, Junio 2005). Dam failure news. *Risk Assessment Dipl.*
- webadmin. (2009, Marzo 27). Yet Another Tragedy Strikes the Nation. *Jakarta Globe*.

Anexo 1. Información Grandes Presas en Colombia

Anexo 2. Área inundable aguas abajo Hidrosogamoso

Anexo 3. Árbol de consecuencias fisicobióticas e indicadores de medición