

**PROYECTO HIDROELÉCTRICO**

# **LAS CRUCES**

**INVIABILIDAD FINANCIERA**

**Y ESTRATÉGICA**

© SuMar-Voces por la Naturaleza, A.C. (2018)

Forma de citar esta publicación:

SuMar (2018), Estudio de viabilidad del Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces  
y de las alternativas de generación eléctrica bajo el enfoque de sustentabilidad (142 páginas).

Estudio realizado con el apoyo financiero de *Resources Legacy Fund* y *The David and Lucile Packard Foundation*.

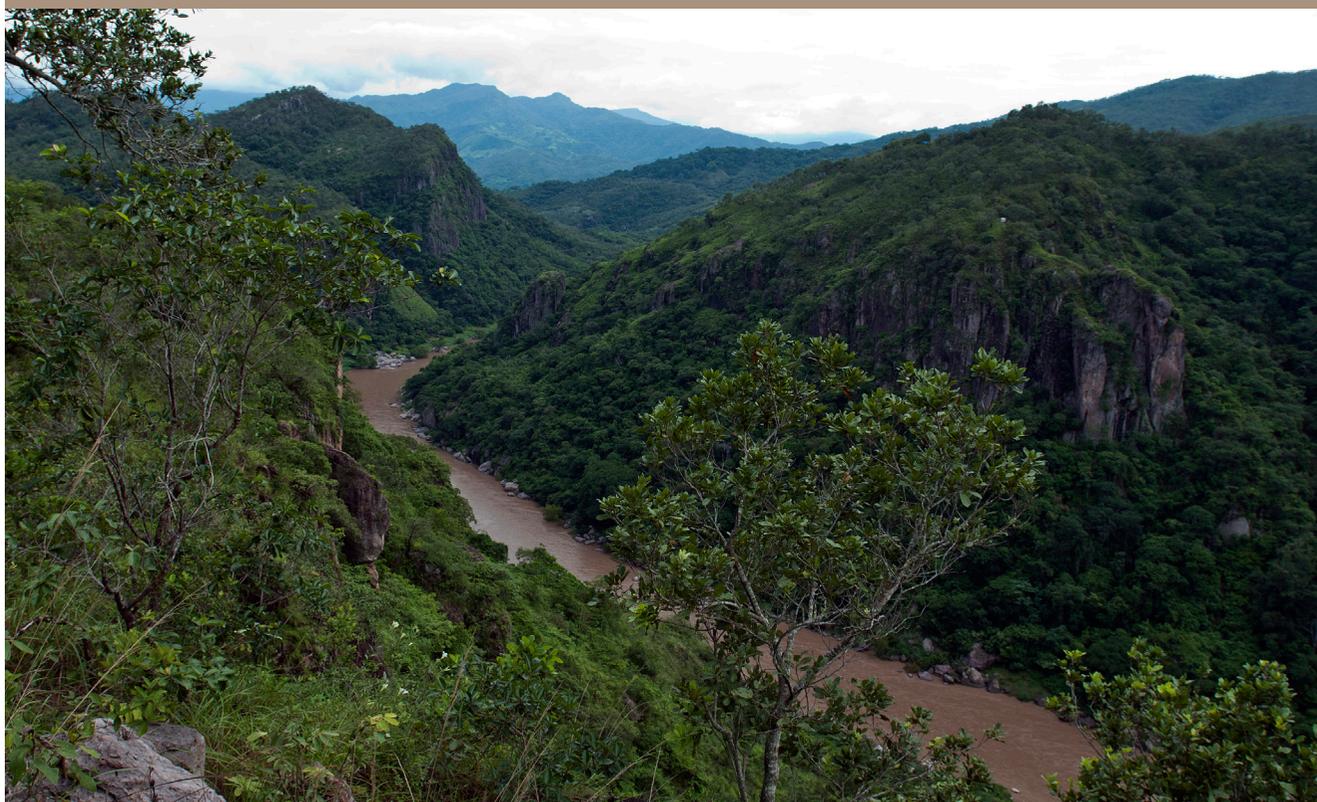
# Índice

Resumen ejecutivo .....	2
Capítulo 1. Identificación de las posibles enfermedades vinculadas a la creación de presas y las enfermedades potenciales en las áreas afectadas por el Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, y determinar su impacto, bajo distintos escenarios .....	5
Marco teórico.....	5
Metodología propuesta para determinar el impacto del PH Las Cruces sobre la salud .....	10
Índices del potencial de criaderos del vector.....	11
Contexto mexicano .....	14
Resultado de la aplicación de la metodología propuesta .....	22
Referencias .....	27
Capítulo 2. Identificación de los aspectos ambientales de la presa y canales .....	29
Introducción .....	29
Descripción del proyecto.....	29
Correcciones a proponer a CFE.....	35
Referencias .....	40
Capítulo 3. Estudio de la interdependencia energética.....	42
Introducción .....	42
Comportamiento de la matriz energética limpia-renovable del país durante el año 2016 .....	42
Seguridad energética y los proyectos hidroeléctricos en el contexto mexicano .....	47
Evaluación del nivel de interdependencia de Las Cruces en el Sistema Eléctrico Nacional .....	48
Interdependencia del proyecto hidroeléctrico Las Cruces con otras centrales eléctricas del Sistema Eléctrico Mexicano .....	51
Vulnerabilidad frente al cambio climático.....	52
Escenarios alternos a la creación del PH Las Cruces.....	53
Conclusión .....	54
Referencias .....	57
Anexo I .....	58
Anexo II .....	61

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Capítulo 4. Geoindicadores .....	62
Introducción .....	62
Contexto mexicano .....	63
Fundamento teórico.....	65
Diseño de indicadores .....	68
Respuestas morfológicas y sedimentológicas en las corrientes debido al impacto humano.....	74
Presas y morfología.....	77
El contexto global de la erosión .....	84
Cambio geomorfológico, de planta y en los patrones del sistema fluvial debidos a la presión de la construcción de un embalse.....	88
Metodología para evaluar la sustentabilidad del sistema fluvial Las Cruces .....	91
Procedimiento para identificar e interpretar las unidades geomorfológicas ensambladas en el río, mediante sensoría remota .....	97
Conclusiones y recomendaciones .....	99
Referencias .....	103
Capítulo 5. Identificación y evaluación de las externalidades .....	108
Revisión de las leyes, reglamentos y normas mexicanas aplicables al proyecto Las Cruces, referentes a externalidades.....	108
Referencias .....	113
Capítulo 6. Compilación histórica de la calidad del agua en la cuenca hidrológica donde se encontraría el proyecto Las Cruces.....	114
Creación de base de datos (BD) con la información recabada .....	114
Capítulo 7. Creación de una matriz con parámetros y factores hidrogeoquímicos-hidrológicos de mayor interés para evaluar el carácter y magnitud de los procesos de ajuste del sistema hidrológico-ambiental .....	117
Evaluación de los parámetros y factores hidrogeoquímicos-hidrológicos aplicables a Las Cruces. .	117
Referencias .....	128
Capítulo 8. Evaluación económica del proyecto Las Cruces, considerando las externalidades, matriz de parámetros y factores hidrogeoquímicos e hidrológicos, así como los geoindicadores .....	129
Integración de las matrices con externalidades, parámetros y factores hidrogeoquímicos - hidrológicos, y geoindicadores en términos monetarios .....	129
Contrastar el costo de Las Cruces y otras tecnologías (alternativas) para el SEM.....	131
Referencias .....	137
<b>2</b> Conclusiones .....	139

# Resumen ejecutivo



Todo proyecto de gran escala posee un costo propio e intangible, que debe ser cuantificado. Para el caso del proyecto hidroeléctrico Las Cruces, existen muchos aspectos por analizar, por no contemplarse en los estudios que solicitó la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). Por ello, el presente estudio amplía el conocimiento sobre la afectación que tendría Las Cruces, considerando los impactos sociales y las afectaciones al sistema ambiental (geológicos e hídricos) bajo distintos escenarios. Asimismo, se evalúan otras alternativas al proyecto para la generación de energía y se realiza un estudio económico sobre los costos tangibles e intangibles de cada propuesta, con la finalidad de encontrar la mejor alternativa.

En septiembre de 2014, la Semarnat autorizó el Manifiesto de Impacto Ambiental (MIA) del proyecto hidroeléctrico Las Cruces, promovido por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La autorización se otorgó de manera condicionada a cumplir con una serie de observaciones, entre ellas, con el Convenio 169 de la Organización Internacional del Trabajo y apegarse al nuevo marco jurídico de la reforma energética.

En particular, la Condicionante I del resolutivo de Semarnat (Oficio No. SGPA/DGIRA/DG 07893), exige a la CFE, entre otros, el cumplimiento del artículo 120 de la Ley de la Industria Eléctrica (LIE, 2014), respecto a la obligación de presentar una evaluación de impacto social que “deberá contener

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

la identificación, caracterización, predicción y valoración de los impactos sociales que podrán derivarse de sus actividades, así como las medidas de mitigación correspondientes”.

Además de lo anterior, el 24 de diciembre de 2015, entró en vigor la Ley de Transición Energética, que en su Artículo 2, Fracción III dice: “Incorporar las externalidades en la evaluación de los costos asociados a la operación y expansión de la industria eléctrica, incluidos aquellos sobre la salud y el medio ambiente”. Esta ley no aplica retroactivamente a Las Cruces, sin embargo, cualquier proyecto hidroeléctrico tendría que considerarla para estimar los costos reales durante su construcción, operación y mantenimiento.

Es en este contexto que SuMar-Voces por la Naturaleza, A.C., realizó el presente estudio técnico en el que, a lo largo de los ocho capítulos, se revisa la viabilidad de Las Cruces bajo un enfoque de sustentabilidad, para apegarse a los estándares internacionales, las deficiencias técnicas en los estudios que la CFE presentó en su MIA, los costos reales del proyecto a 2018 y los costos no considerados (externalidades), así como las alternativas de generación de electricidad.

## Principales resultados

- ▼ Las Cruces no es necesaria hoy, ni a futuro, para satisfacer los requerimientos del sistema eléctrico nacional.
- ▼ Sus impactos en la salud y la economía local no se evaluaron ni se incorporaron las medidas de mitigación a los costos del proyecto.
- ▼ Aún sin considerar las externalidades, el costo del proyecto pasó de \$ 7,995 millones de pesos en 2012, a \$ 13,300 millones de pesos en 2018.

Finalmente, se concluye que con la apertura del sector eléctrico a la inversión privada y las tendencias internacionales de generación de energía con fuentes renovables, han cambiado las proyecciones de la Secretaría de Energía, pues en el Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (Prodesen) 2016-2030 ha retirado de sus planes al proyecto hidroeléctrico Las Cruces; y en el Prodesen 2017-2031, propone en su lugar una diversificación de la matriz eléctrica con tecnología renovable.

# Capítulo 1

## Identificación de las posibles enfermedades vinculadas a la creación de presas y las enfermedades potenciales en las áreas afectadas por el Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, y determinar su impacto bajo distintos escenarios

### Marco teórico

Existe una amplia variedad de proyectos hidroeléctricos, cada uno provee diferentes tipos de servicios y genera un impacto ambiental y social de diferente naturaleza y magnitud (Egré y Milewski, 2002). Por tanto, cada tipo de hidroeléctrica debe cumplir con diferentes servicios eléctricos como:

1. La generación de energía base y de picos, en regiones donde existen varias hidroeléctricas y hay alta disponibilidad de recursos hídricos.
2. La generación extra de carga eléctrica; se emplea en regiones donde las hidroeléctricas no son abundantes y se emplean únicamente para los picos de demanda.

Desde un punto de vista técnico, la energía producida por las hidroeléctricas es una medida complementaria a otras fuentes primarias de generación eléctrica, supliendo la demanda de energía al tiempo que es demandada. Además del tamaño, los reservorios varían en área por varios órdenes de magnitud, dependiendo de la altura de la presa, la topografía local y los servicios energéticos deseados. Lecornu (1998)

señala que entre mayor sea el volumen de almacenamiento, mayor será la seguridad energética que proveerá; pero también mayores serán los impactos ambientales y ciertamente mayor será la controversia referente al costo-beneficio de la misma.

Los mayores impactos ambientales relacionados con el reservorio están muy bien documentados, y se sabe que tienen su origen en:

- ▼ Las actividades de construcción involucradas en la edificación de la presa, diques, embarques y la planta de energía;
- ▼ La presencia de infraestructura (caminos de acceso, líneas de transmisión, subestación, etc.);
- ▼ Los cambios en los patrones de flujo del río; y
- ▼ La creación de un reservorio, posiblemente generando los mayores cambios ecológicos en los ambientes terrestres y riverenos, convirtiéndolos en un híbrido entre un ambiente tipo lago y un río. También cambios en el uso de suelo, como lo experimentan las comunidades y sus actividades productivas.

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Las presas hidroeléctricas no solo han causado un desplazamiento masivo de personas, impactando los sistemas económicos, destruyendo tierras arables debido a la salinización y alterando los patrones de los cultivos (Duflo y Pande, 2007). Sino que afectan en gran medida la salud humana, la cual se ve impactada por la modificación, tanto de la cantidad como la calidad del agua del sistema fluvial sobre el que se desarrolla el proyecto. Los impactos de las presas son complejos y pueden ser tanto positivos como negativos. Las externalidades positivas incluyen la disponibilidad para irrigación en la agricultura y el incremento en la producción energética y el control de avenidas; además de oportunidades de recreación y turismo. Las externalidades negativas incluyen reubicación de la población, diversos impactos en la salud humana, la disminución de la población de peces, deterioro de la calidad y cantidad del agua corriente abajo, así como la reducción de la actividad económica, particularmente en la comunidades rurales. Los problemas relacionados con las hidroeléctricas deberían poseer una componente de justicia ambiental, pues los más afectados son las sociedades más pobres, dejándoles, entre otros efectos negativos, vulnerables a enfermedades infecciosas (Polimeni, *et al.*, 2014).

Aunque las funciones que desarrollan los ecosistemas son invaluable y los cambios en estos sistemas son irreversibles, la evaluación de las presas se realiza generalmente en términos de costos económicos (Ojeda *et al.* 2008). Sin embargo, estas evaluaciones tienden a sobreestimar los beneficios y desvalúan su costo (Adams, 2000). De forma general, la evaluación económica de las presas no toma en cuenta los costos

ambientales, la salud pública y el costo social de las comunidades que se localizan aguas abajo. Barbier (2002) encontró que la hidrología de las planicies de inundación es alterada de forma irreversible, lo que afecta de manera considerable la economía de las comunidades rurales aguas abajo. Los cambios en la ecología de las planicies afectan la vegetación (Attwell, 1970; Sheppe, 1985), bosques (Hughes, 1988), peces (Hyslop, 1988), y fauna (Dunham, 1994; Nilsson y Dynesius, 1994; Obrdlik *et al.*, 1989).

La creación de un reservorio causa cambios físicos, químicos y biológicos en el agua (Bergkam *et al.*, 2000), lo que conduce a varios efectos aguas abajo cuando el agua es liberada de la presa (Bergkam *et al.*, 2000; McCully, 1996; Schouten, 1998). Además, Sayboulaven (2004) y Lanza (2011), han encontrado que, durante la construcción de las presas, situaciones como la diarrea aumentan en un orden del 60%. Relacionado con este problema se encuentran las lombrices intestinales. Los pobladores se ven infectados debido al contacto con el suelo contaminado con desechos humanos de personas infectadas o por la ingesta de comida contaminada. Los estudios muestran que los incidentes de lombrices intestinales se triplica con la construcción de las presas. Los parásitos intestinales son, de hecho, una de las enfermedades prevalentes (*Ethiopian Electric Power Corporation*, 2009).

Los impactos negativos de las presas sobre la salud pública se relacionan con las externalidades ambientales y económicas. Por ejemplo, Uyigue (2007) exploró la correlación entre la incidencia de esquistosomiasis y

## Capítulo 1

las comunidades con presas en Nigeria, revisando 47 presas donde se realizaron pruebas por esquistosomiasis. Por otra parte, Ghebreyesus *et al.* (1999) estudiaron la incidencia de malaria en niños que habitaban en comunidades localizadas cerca de presas en Etiopía, con aproximadamente datos de 7,000 niños menores de 10 años localizados dentro de un radio de 3 km de la presa y en villas de control, localizadas a 8 y 10 km de la presa. Encontraron que mientras que la malaria fue prevalente en ambas comunidades, la tasa de incidencia en las villas cercanas a las presas fue de 14 episodios por cada 1,000 niños al mes, con un riesgo comparado de 1.9 en las villas de control; es decir, la tasa de incidencia es siete veces más alta.

Normalmente, los impactos a la salud son menos severos que la esquistosomiasis y la malaria; sin embargo, estas suelen ser bastante serias, por ejemplo:

- ▼ McCully (1996) encontró que las algas son propensas a multiplicarse cercanas a la superficie de reservorios eutróficos, lo que causa que el agua no sea potable.
- ▼ Otro asunto concerniente a la calidad del reservorio es la creación de nitratos que ocasiona envenenamiento, lo que conlleva a una cianosis, anoxia, desórdenes estomacales e intestinales, mareos, hipertensión, fallo respiratorio (Robertson, 1992).
- ▼ Además, el envenenamiento por metilmercurio es común en los grandes reservorios, lo que lleva a efectos serios a la salud con una exposi-

ción prolongada (McCully, 1996).

- ▼ Existen varias sustancias disueltas en los reservorios como sulfatos, hierro o manganeso (Bergkam *et al.*, 2000; McCully, 1996; Schouten, 1998) que conllevan a problemas en los riñones e hígado.
- ▼ Childress (2009), Ball *et al.* (2005) y Stokes y Wren (1987) han documentado que el arsénico prevalece en áreas cercanas a las presas hidroeléctricas, en las aguas subterráneas.
- ▼ Por su parte Bai *et al.* (2009), Xiao *et al.* (2013), y Zhao *et al.* (2013) han encontrado altos niveles de arsénico y otros metales pesados en los cuerpos de agua cercanos a las presas hidroeléctricas en China.
- ▼ Carrel *et al.* (2010) pone en evidencia el creciente riesgo de cólera en regiones “protegidas” ante avenidas, como son aquellas cercanas a las presas. El cólera es fácilmente esparcido en regiones sin agua limpia, por lo que la disminución en la calidad del agua debido a las hidroeléctricas hacen de éstas un detonante.

Otra enfermedad asociada a las presas es la encefalitis. Esta enfermedad se transmite de humano a humano por un mosquito infectado. Las ocurrencias de esta enfermedad en los estudios correspondientes incrementaron en un rango del 26.34 % - 35.89 %. Patz *et al.* (2005) encontraron que las presas hidroeléctricas contribuyen al incremento de la encefalitis en Asia,

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

registrando casos en Japón. Renshaw *et al.* (1998) encontraron que existe un incremento en el riesgo de contraer la malaria tanto en un reservorio de presa como en campos de irrigación, y por su parte Yewhahlaw *et al.* (2010) encontraron que la malaria es uno de los problemas de salud más serios en las villas cercanas a las presas hidroeléctricas en Etiopía, comparado con las villas alejadas de éstas. Por tanto, se puede deducir que más agua no significa mayor calidad. La literatura (Polimeni *et al.*, 2008; Scudder, 1999; Mehta y Srinivasan, 1999; Srinivasan, 1997; Cernea, 1996; Burfishers y Horestein, 1985) muestran que la salud de la mujer, en particular, está más impactada por las presas hidroeléctricas, por lo que el problema además de salud, es un problema de justicia ambiental no atendido en nuestro país desde la perspectiva de género.

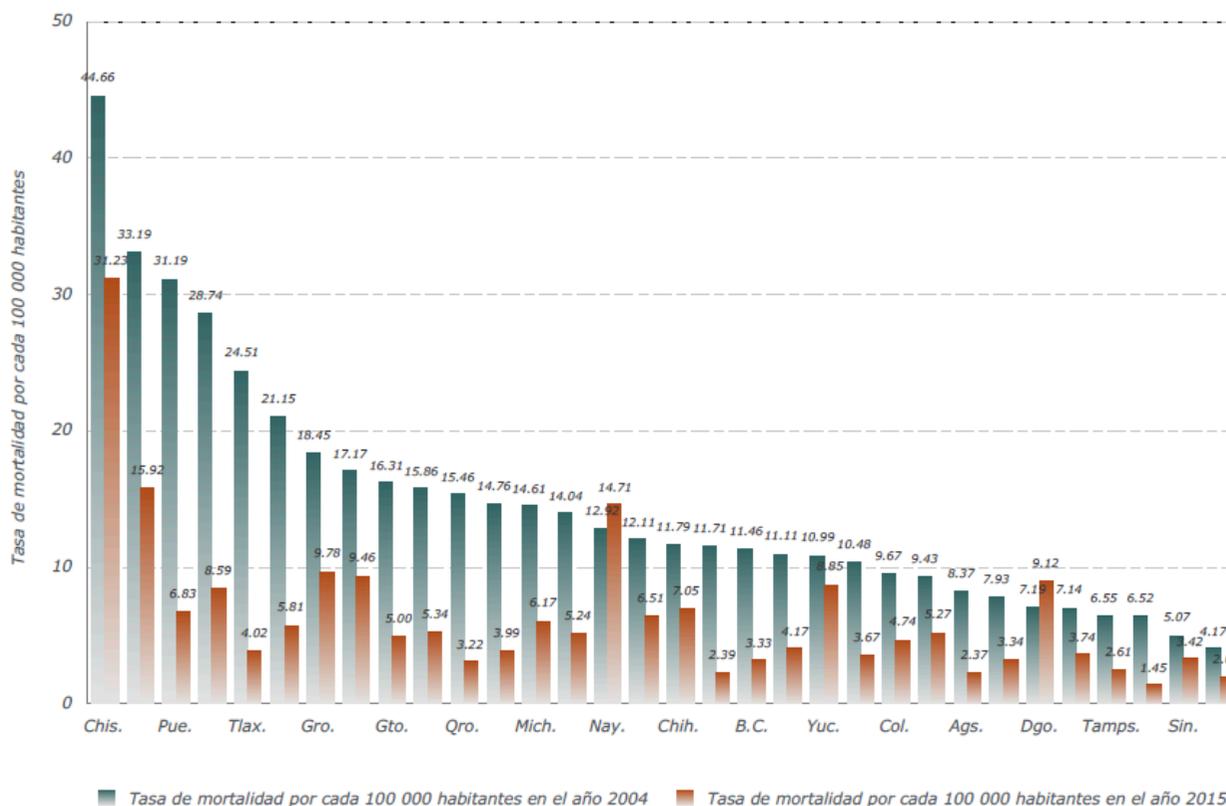
Es importante comprender que una medida correctamente fundamentada e implementada solo puede reducir, pero no erradicar, las enfermedades relacionadas a las presas, ya que éstas son un poderoso agente para el esparcimiento de enfermedades, especialmente en áreas tropicales y subtropicales, en especial cuando están acompañadas de esquemas de irrigación (McCully, 1996). El primer riesgo a la salud de un proyecto hidroeléctrico comienza con la llegada de un gran número de trabajadores a un área remota, los cuales comúnmente acarrean enfermedades infecciosas como: tuberculosis, sarampión, influenza, sífilis y SIDA. Algunas de estas enfermedades, pueden ser nuevas en la región cercana a la presa y afectar a las personas de las comunidades o de los alrededores, las cuales normalmente tendrán un nivel de inmunidad bajo, aspecto que no es considerado en

nuestro país al momento de presentar el Manifiesto de Impacto Ambiental.

Las presas y canales poseen un gran impacto sobre la salud, en especial en climas tropicales. La creación de una presa mantiene expuesta una masa de agua con una velocidad muy baja, la cual persiste durante temporadas de secas, lo que permite el desarrollo de grandes hábitats para insectos acuáticos y caracoles, los cuales son portadores de enfermedades en humanos y animales (Williams y Wolman, 1985). La principal razón por la que las presas y los sistemas de irrigación esparcen enfermedades es que estas crean hábitats para los insectos, caracoles y otros animales que sirven como vectores. Los canales y sus drenes complementarios son un sitio ideal para la reproducción de mosquitos y caracoles, pero además, estos permiten que los vectores entren en contacto con la población, especialmente con quienes trabajan en campos de cultivo. Entre más grande y estable sea el reservorio, más numerosas serán las poblaciones de insectos portadores de enfermedades; y entre más intensiva las rotaciones de irrigación, más personas serán necesarias para trabajar en los campos de cultivo y, por tanto, más intensa será la transmisión de enfermedades relacionadas con el agua (Williams y Wolman, 1985). Las enfermedades diarreicas son probablemente las más comunes en las zonas tropicales, dentro o fuera de los proyectos hidráulicos (Williams y Wolman, 1985). La malaria es la enfermedad más prominentemente asociada con la irrigación y los reservorios de agua en los trópicos, seguida por las enfermedades transmitidas por los caracoles, denominada esquistosomiasis; que es una enfermedad parasitaria, sin altas

# Capítulo 1

Figura 1. Mortalidad por enfermedades diarreicas en menores de 5 años por entidad federativa.



tasas de mortalidad, pero es altamente incapacitante (Williams y Wolman, 1985).

Existen tres problemas de salud concernientes a la construcción de grandes presas y proyectos hidráulicos que no se reportan y no son considerados, los cuales no encajan en los patrones usuales para las enfermedades asociadas al agua (Williams y Wolman, 1985). El más importante de ellos es la enfermedad, muerte y trauma asociado con la reubicación forzada de las poblaciones - en su mayoría- indígenas. Segundo, las enfermedades de transmisión sexual asociadas con los grandes campamentos durante la construcción, incluyendo infecciones clásicas y algunas de alto riesgo como el SIDA (Williams y Wolman, 1985). Tercero los accidentes y decesos relacionados

con la construcción, los cuales acompañan a los grandes proyectos hidroeléctricos, ya que se labora con maquinaria pesada, explosivos, y condiciones de vida difíciles (Williams y Wolman, 1985).

Las enfermedades diarreicas existen en grandes grupos que incluyen al cólera, fiebre tifoidea, hepatitis, infecciones intestinales y otras, que son la mayor causa de muerte entre los infantes y niños (Williams y Wolman, 1985), p.e., Nayarit y Durango son los estado de la república que elevaron sus números durante el 2015 en comparación con el año 2004 (Figura 1). Estas enfermedades se transmiten en una variedad de formas, pero la mayoría son prevenibles si se maneja un correcto consumo del agua y una disposición adecuada de los desechos humanos (Williams y Wolman, 1985).

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

## Metodología propuesta para determinar el impacto del PH Las Cruces sobre la salud

Existe una abundante evidencia en la literatura de que las construcciones relacionadas con recursos hídricos en climas áridos conducen a una muy rápida y creciente incidencia de enfermedades relacionadas con el agua (Carter *et al.*, 1990). Caso especialmente particular en la construcción de grandes presas y esquemas de irrigación. La Organización Mundial de la Salud, WHO (1982), identifica los mayores parámetros para que exista un criadero (Tabla 1) y clasifica los hábitats en nueve clases principales (Tabla 2). Los principales hábitats de interés son aquellos de la categoría A1 (reservorios, lagos, albercas, bahías, grandes excavaciones inundadas, corrientes lentas, charcos en ríos o corrientes), y en menor medida los A2 (marismas y pantanos) y B1 (piscinas semipermanentes y agua de derrame; diques en carreteras, drenaje obstruido, pequeñas inundaciones, surcos, huellas, depresiones naturales en el suelo y charcos en campos de cultivo) (Carter *et al.*, 1989).

**Tabla 1. Parámetros del hábitat de mosquitos (WHO, 1982).**

Principales parámetros para describir los criaderos de mosquitos:
Sombra/sol
Quietud/flujo de agua
Temperatura
Contenido de sal
Superficie y vegetación aflorante
Contaminación orgánica

**Tabla 2. Tipos de criaderos de mosquitos (WHO, 1982).**

Tipo	Descripción
A	Grandes cuerpos de agua fresca en exposición total o parcial al sol.
B	Pequeñas colecciones de agua de filtración, estancada, normalmente lodosa, pero no contaminada; exposición total o parcial al sol; vegetación presente o ausente.
C	Campos de cultivo.
D	Agua salobre y lagunas; con peces; total o parcialmente expuesta al sol.
E	Parcialmente o fuertemente cubierta, en bosques o junglas.
F	Curso de agua corriente, agua fresca, exposición directa al sol.
G	Manantiales, filtraciones, canales de irrigación y tanques; agua clara; exposición directa al sol.
H	Huecos de plantas y cavidades; surcos.
I	Contenedores artificiales; pozos, cisternas, tanques de almacenamiento, cuencas ornamentales, plásticos, paquetes, etc.

La creación de un reservorio abierto, ya sea grande o pequeño, puede proveer de un sitio de criadero favorable en las profundidades marginales, especialmente cuando hay vegetación presente, para el desarrollo de criaderos de caracoles portadores de esquistosomiasis (Tabla 3) (Carter *et al.*, 1989).

**Tabla 3. Condiciones óptimas para criaderos de caracoles portadores de esquistosomiasis.**

Parámetro en hábitat	Descripción
Temperatura de agua	Óptimo 25-26 °C con un rango de 22 -27 °C; máximo de 32 °C.
Velocidad de flujo	La velocidad periférica no excede los 0.3 m/s
Profundidad del agua	0.0 a 2.0 m

# Capítulo 1

Turbidez	Preferentemente menor a 360 mg/l
Acción de olas	Gentilmente marginal, si hay.
Luz de sol	Parcialmente sombreado, fuera de la luz del sol directa.
Química del agua	pH de 5 a 6; el contenido de calcio idealmente entre 80 ppm, con presencia de K y Mg.
Substrato	Lodo, rico en materia orgánica.

## Índices del potencial de criaderos del vector

El grado de riesgo que posee un reservorio en particular (existente o planeado) debe ser cuantificado con la intención de hacerlos manejables. Los parámetros simples como el área superficial (Jewsbury y Imevbore, 1988) o el área superficial marginal del agua a menos de 2 m de profundidad (Brook, 1988), que puede ser empleado como el primer indicador de un potencial hábitat del vector. WHO (1982) describe un índice para determinar el potencial de criadero de mosquitos, el cual es una función de la longitud de la orilla, el área del reservorio y el volumen del mismo. El Potencial Marsh (PM) se define como:

$$\text{Potencial Marsh} = \frac{\text{longitud de la orilla (m)} \times \text{área del reservorio (m}^2\text{)}^{0.5}}{\text{volumen del reservorio (m}^3\text{)}}$$

Altos valores en el PM se tienen para un rango de 18 a 20 m<sup>-1</sup>, mientras que los valores bajos del reservorio con menos potencial están en el orden de 2 a 3 m<sup>-1</sup>. Intuitivamente, el PM parecerá incluir aquellas características de relevancia para evaluar el potencial; se debe tener cuidado en su uso. Para poder comparar los posibles índices del potencial del criadero del vector, es útil considerar un reservorio hipotético de una forma piramidal triangular (Figura 2). Puede ser mostrada como un reservorio que posee la siguiente relación:

$$\text{Área Superficial} = H^2 \cot \theta \cdot \cot \phi \quad (1)$$

$$\text{Volumen almacenado} = 0.33 H^3 \cot \theta \cdot \cot \phi \quad (2)$$

$$\text{Perímetro del reservorio} = 2 H (\cot \theta + \sqrt{\cot^2 \theta + \cot^2 \phi}) \quad (3)$$

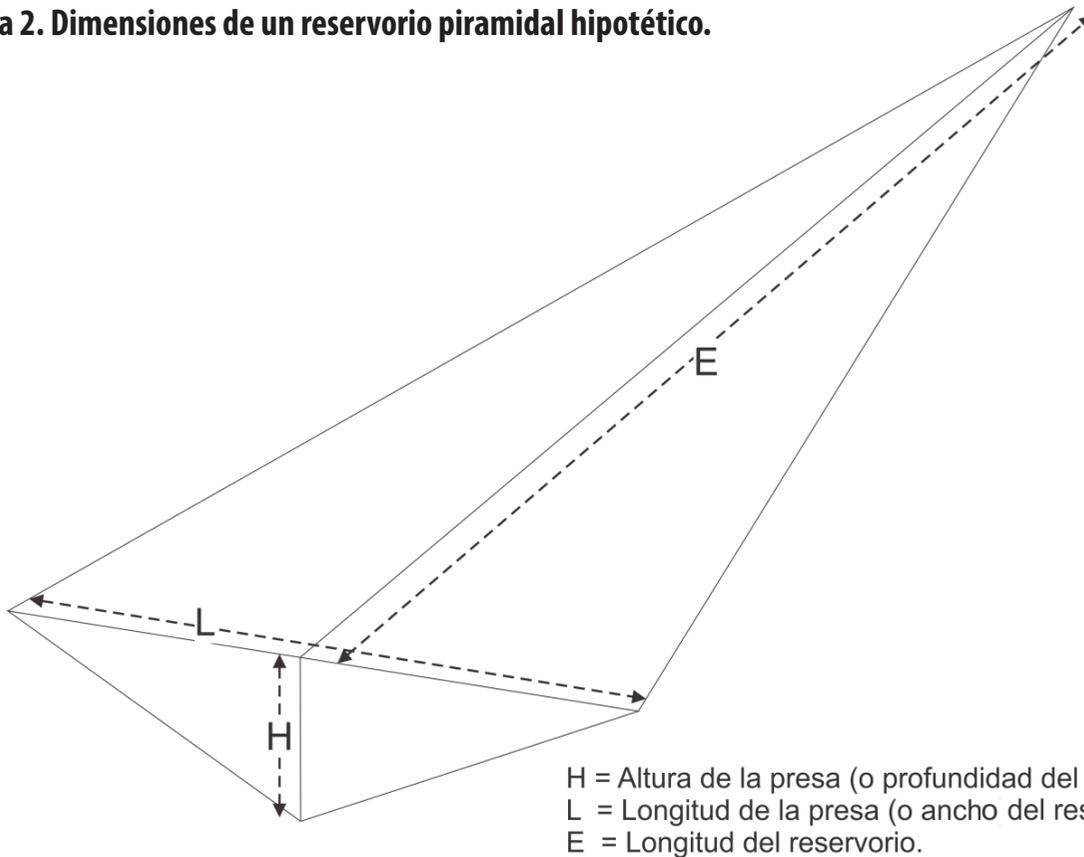
donde H es la profundidad del agua en el punto medio de la presa y  $\theta$  y  $\phi$  son, respectivamente, la (uniforme) transversal y longitudinal pendientes del valle.

El Potencial Marsh, como una función del área, volumen y perímetro, se puede reducir a:

$$\text{Potencial Marsh} = \frac{1}{H} \cdot \frac{6(\cot \theta + \sqrt{\cot^2 \theta + \cot^2 \phi})}{\cot \theta \cot \phi}$$

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

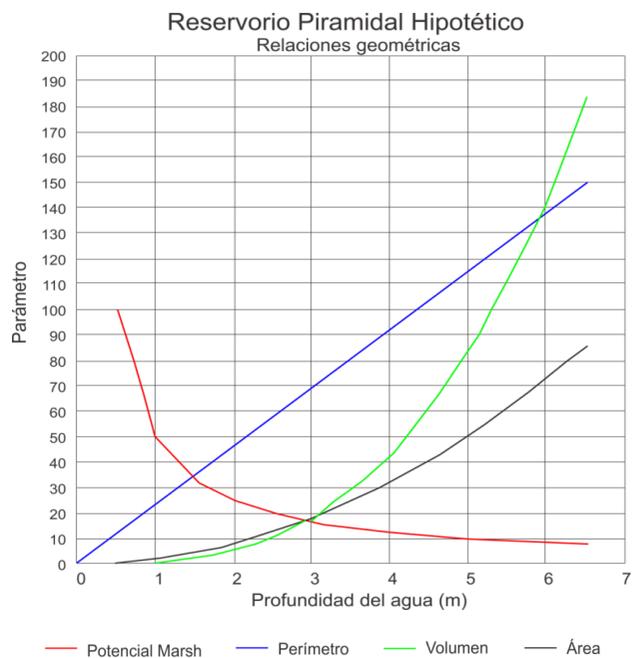
Figura 2. Dimensiones de un reservorio piramidal hipotético.



El PM disminuye en una simple función inversa (Figura 3). La razón es clara; el numerador del PM es el índice real del potencial de hábitat del vector, y ésta es expresada en una base por volumen. La finalidad es comparar el reservorio propuesto con otros, especialmente cuando se tienen numerosas pequeñas presas; no es útil como una herramienta para manejar sitios individuales.

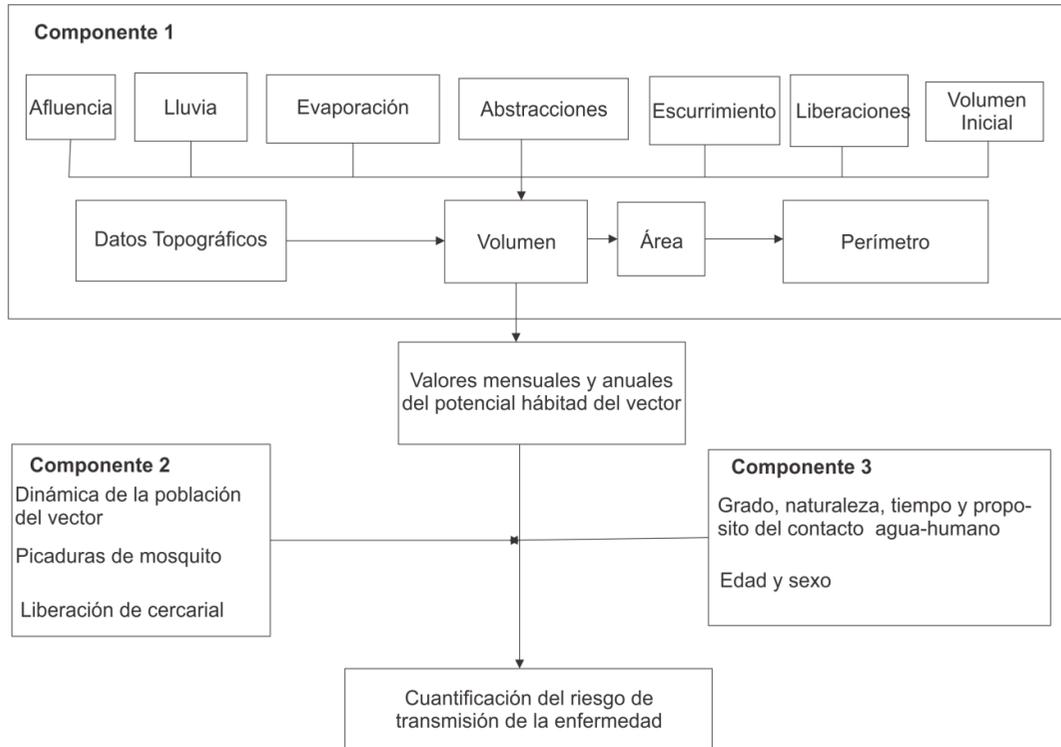
El índice más útil para predecir el potencial de hábitat de los vectores, es el Potencial de Hábitat del Vector (PHV), (Carter *et al.*, 1989). Incluso asumiendo que podamos cuantificar la población de vectores y su comportamiento (e.g. tasa de picaduras de mosquito, reproducción de caracoles), este conocimiento necesita estar vinculado al comportamiento humano, con la finalidad de predecir el riesgo de

Figura 3. Reservorio piramidal hipotético - relaciones geométricas, para relacionar el Potencial Marsh, el perímetro, área y volumen en función de la profundidad del agua.



# Capítulo 1

**Figura 4. Metodología para predecir el riesgo de enfermarse por un vector de transmisión.**



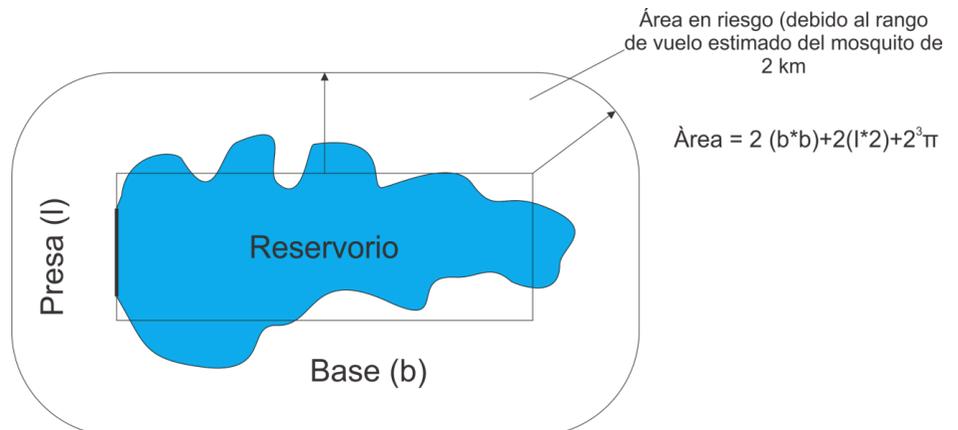
transmisión de enfermedades. Los factores importantes incluyen la proximidad de las comunidades al reservorio; grados, tiempo y propósito del contacto con el agua; y segmentos de la población involucrados (especialmente por sesgo de género y edad). La metodología empleada predice el riesgo de contraer la enfermedad por el vector, con base en los siguientes parámetros (Figura 4).

Una forma de estimar el área en riesgo debido al vector que transporta la malaria y otra enfermedad (si es el mismo vector), es por medio la siguiente fórmula (Figura 5).

## Contexto mexicano

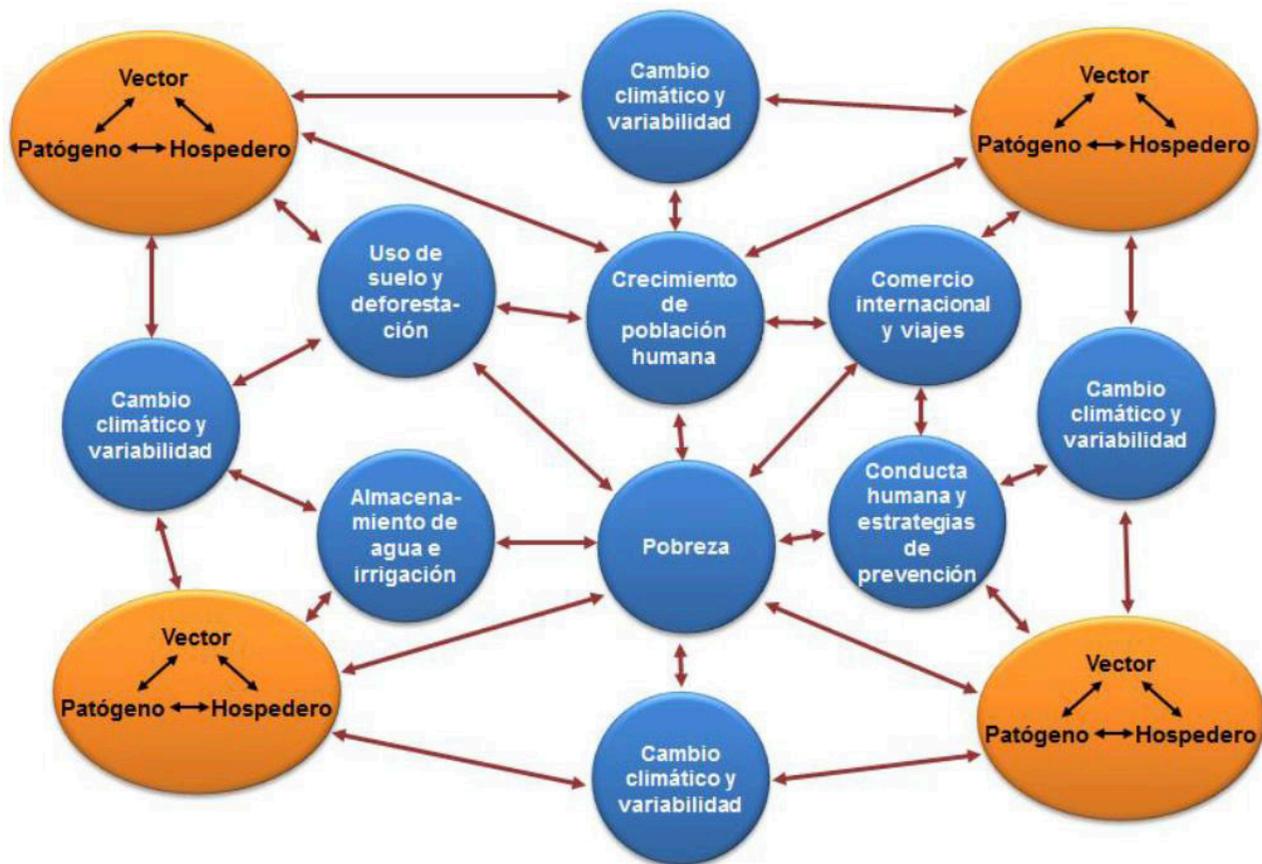
Las enfermedades transmitidas por vector (ETV) y zoonóticas, inciden en la dinámica poblacional

**Figura 5. Estimación del área en riesgo para la malaria cerca del reservorio.**



# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Figura 6. Episistemas que conforman el medioambiente y se observa su dinámica (Cofepris-SS, página Web).



y en la transmisión de enfermedades. Se trata de procesos ecológicos complejos en los que intervienen factores ambientales y sociodemográficos, por lo que es difícil efectuar predicciones lineales (Berberian y Rosanova, 2012; Rogers y Randolph, 2006). Las ETV pueden ser representadas por “Episistemas” (Tabachnick, 2010), que son sistemas dinámicos ajustados de manera continua a las formas complejas de cambios en el medio ambiente, como se observa en la Figura 6, según lo propone la Cofepris-Secretaría de Salud.

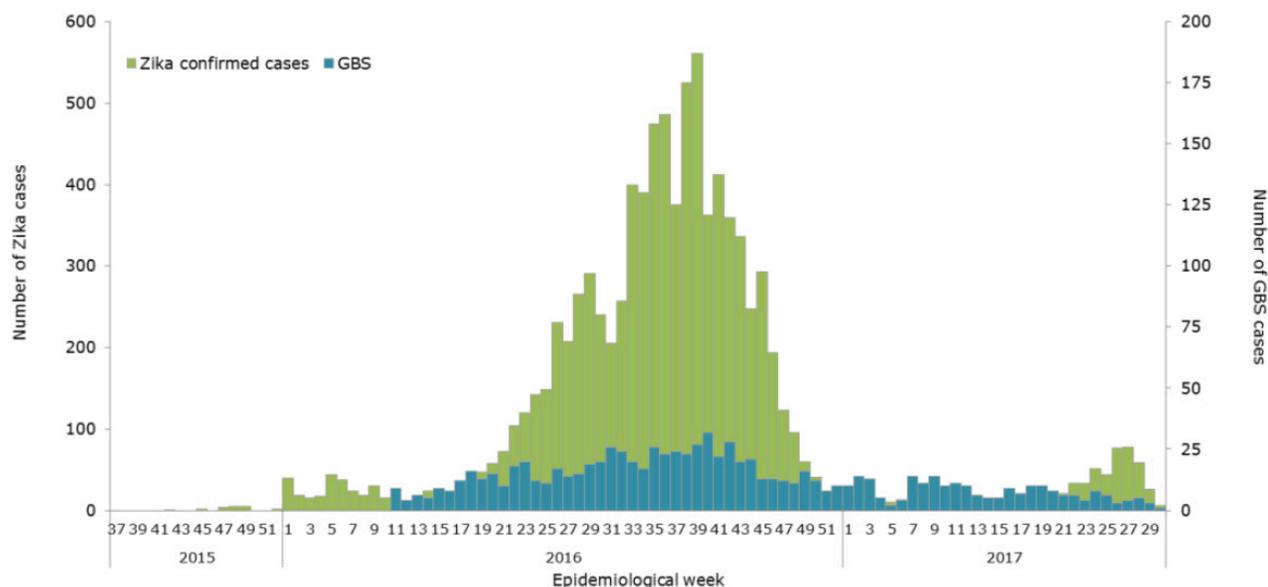
La mayoría de los vectores son ectotérmicos, y por ende están sujetos a los efectos de las fluctuaciones de temperatura, lluvia y humedad en su desarrollo,

reproducción, conducta y dinámica poblacional (Cerdeira *et al.*, 2008). Los patrones de temperatura también afectan el desarrollo de los agentes patógenos en los vectores, y por ende, en su capacidad vectorial (Gage *et al.*, 2008). Si las condiciones ambientales, como la humedad y la temperatura, se mantienen en niveles que favorecen la diseminación de la infección y la población aumenta en forma proyectada, se prevé que en el año 2055 aproximadamente 3,200 millones de personas (34 % de la población mundial) estarán en riesgo de contraer dengue (Ramírez-Zepeda *et al.*, 2009; Gage *et al.*, 2008).

En México, la incidencia de casos de dengue pasó de 5,220 casos en 2003 a 40,559 en 2007, con 1,776

## Capítulo 1

**Figura 7. Casos confirmados de zika y el síndrome Guillain-Barré, México, Semana Epidemiológica 37 de 2015 a la Semana Epidemiológica 30 de 2017. (Fuente: PAHO/WHO).**



y 7,897 casos de dengue hemorrágico, respectivamente. Aunque en la actualidad circulan los cuatro serotipos virales, el número de muertes por dengue se ha mantenido por debajo del 1 % del total de casos de dengue hemorrágico (Ramírez-Zepeda *et al.*, 2009). Por ende, este padecimiento se ha convertido en una de las principales prioridades de salud pública, ya que el país reúne las condiciones geográficas, ambientales y socioeconómicas que propician la ocurrencia de brotes importantes, así como la transmisión de la enfermedad en regiones que antes no se consideraban propicias (Gómez-Dantés, 1991).

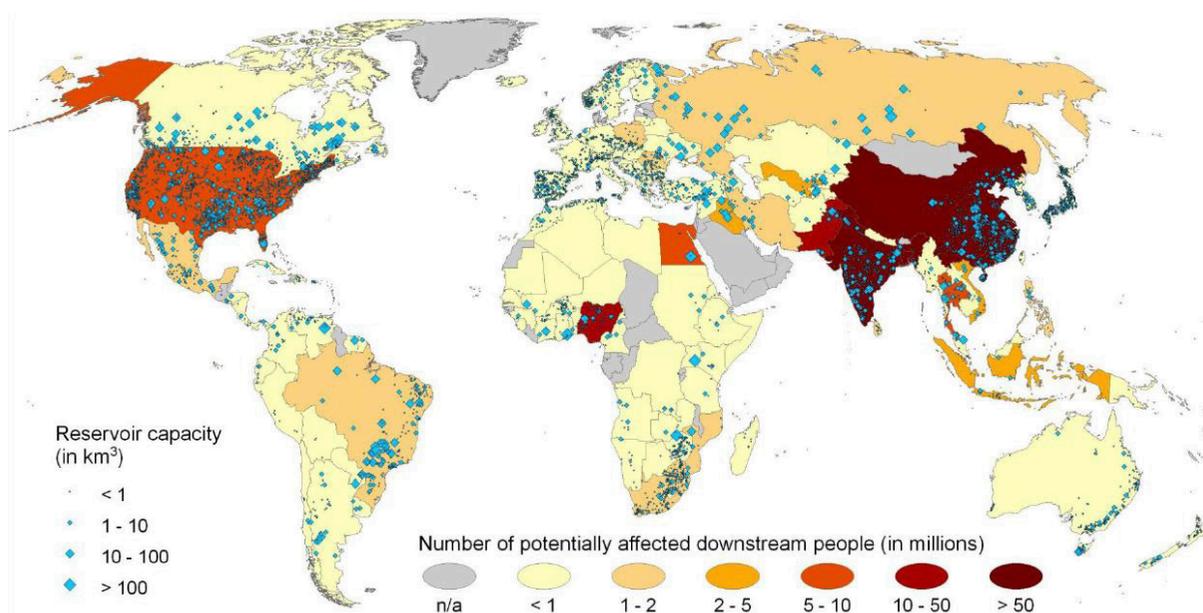
El zika, es una enfermedad causada por el virus Zika (ZIKAV), un arbovirus del género flavivirus (familia Flaviviridae), muy cercano filogenéticamente a virus como el dengue, fiebre amarilla, la encefalitis japonesa, o el virus del Nilo Occidental. El virus se aisló por primera vez en 1947 en los bosques de Zika (Uganda), en un mono Rhesus durante un estudio sobre la

transmisión de la fiebre amarilla selvática. Aunque la infección en seres humanos se demostró por estudios serológicos en 1952 (Uganda y Tanzania), (Dick *et al.*, 1952; Dick, 1952), solo hasta 1968 se logró aislar el virus a partir de muestras humanas en Nigeria (Moore *et al.*, 1975; Fagbami, 1979). En México existen ocho casos confirmados de síndrome congénito asociado a zika, durante el 2017, los diagnósticos incluyen tres decesos, y las variantes asociadas son microcefalia, macrocefalia, hidrocefalia y anencefalia (SS, 2017). Pero anteriormente, entre el año 2015 y 2016, se registró un total de 5,065 casos confirmados por el virus Zika en mujeres embarazadas; con 602 decesos confirmados (64 casos en el estado de Nayarit).

Algunas de las complicaciones del zika asociados es el síndrome Guillain-Barré (SGB), durante la semana epidemiológica 30 de 2017, la Secretaría de Salud reportó un total de 1,131 casos del SGB en todo el país. La Figura 7 muestra la distribución del

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Figura 8. Distribución de las poblaciones rurales potencialmente afectadas que viven aguas abajo de grandes presas, cercanas a ríos impactados (números son totales por país).**



SGB y los casos confirmados de zika por semana epidemiológica.

Cambios en la biodiversidad (incluye la pérdida de depredadores y cambian la densidad de población) (Káiser *et al.*, 2005), por ejemplo, la deforestación, altera el riesgo de malaria, dependiendo de la región del mundo. Un ejemplo de actividad antropogénica directa, que afecta el riesgo de enfermedad, incluyendo la destrucción del hábitat de vida salvaje, conversión, o invasión, particularmente mediante la deforestación y reforestación; los cambios en la distribución y disponibilidad de agua superficial, como con la construcción de presas, irrigación, y diversificación de corrientes; cambios en el uso de suelo, etc. (Káiser *et al.*, 2005). La Figura 8 muestra las poblaciones rurales potencialmente afectadas donde se han realizado cambios en el régimen hidrológico debido a grandes presas.

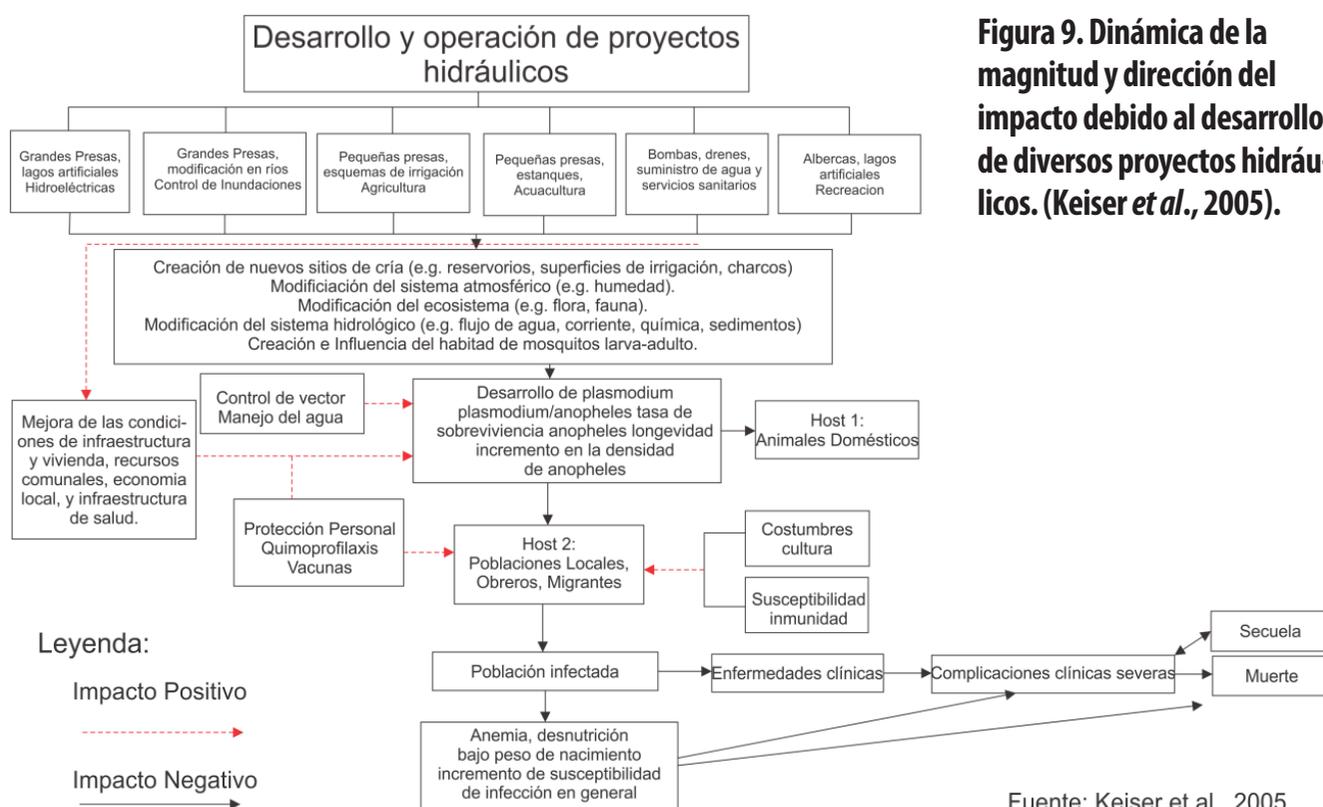
La dinámica del impacto global debido a la creación de diversos proyectos hidráulicos queda representado en la Figura 9. En ella se muestran cómo la naturaleza del proyecto, que van de grandes proyectos como son las hidroeléctricas hasta albercas y lagos artificiales; cómo estos cambios crean sitios de cría, mediante la modificación de % de humedad, del ecosistema y el sistema hidrológico. También se muestran las acciones que pueden ser emprendidas por las comunidades para parar el desarrollo de los vectores y finalmente las consecuencias del desarrollo de las enfermedades transmitidas por los vectores.

Las siguientes enfermedades están valuadas como prioritarias por su gran carga global de infección y su alta sensibilidad al cambio ecológico:

### **Malaria**

El desarrollo de los proyectos hidroeléctricos en los

# Capítulo 1



**Figura 9. Dinámica de la magnitud y dirección del impacto debido al desarrollo de diversos proyectos hidráulicos. (Keiser et al., 2005).**

tropicales, seguidos resultan en epidemias de malaria durante la construcción de las presas y canales debido a:

- ▼ Incrementos en sitios de incubación debido a las excavaciones.
- ▼ Importación de nuevas cepas de malaria debido a los obreros migrantes, con instalaciones inadecuadas, i.e., campamentos sin ventanas; y
- ▼ Disturbio de la estructura social de la población local durante el restablecimiento, como el deterioro en sus hogares y la irrupción de sus servicios normales de salud.

Por lo tanto, los problemas de malaria pueden persistir alrededor de los proyectos hídricos después de ser completados, debido a:

- ▼ Nuevos criaderos de mosquitos, debido al agua estancada y escurrimientos;
- ▼ La creación de criaderos relacionados a nuevas prácticas, como cuencas de irrigación por arroz, etc.
- ▼ Creación de criaderos en áreas de irrigación debido al pobre drenaje; e
- ▼ Incremento de las poblaciones humanas próximas a criaderos de mosquitos debido a los requerimientos de empleo, especialmente durante temporadas de cosecha y deshierbe.

Los problemas de malaria pueden persistir alrede-



# Capítulo 1

**Tabla 4. Enfermedades transmitidas por vectores asociadas con el agua.**

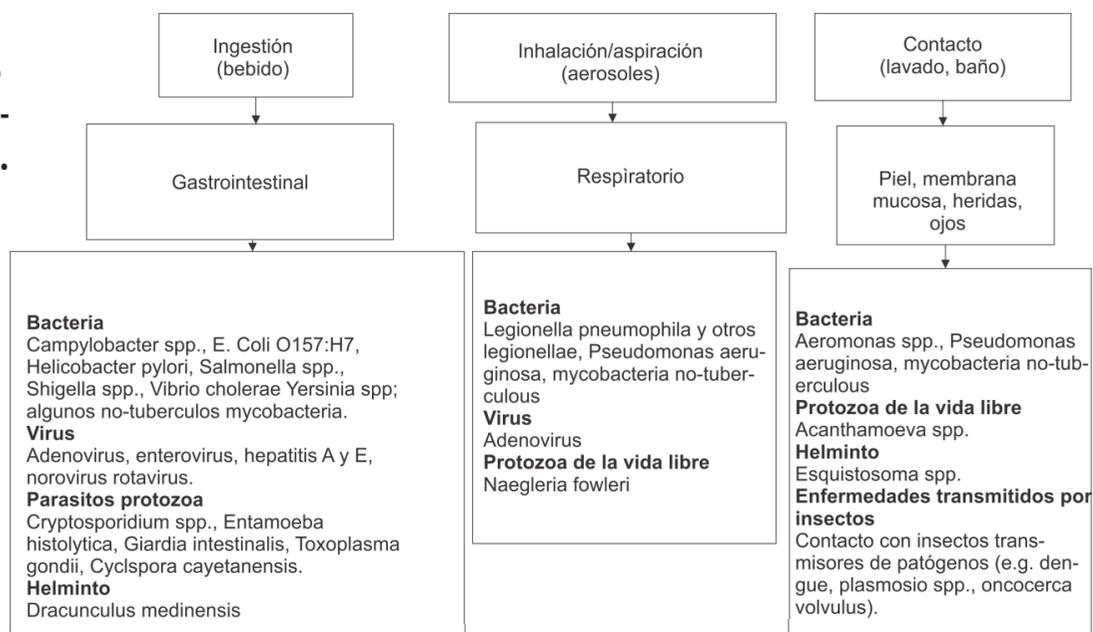
Patógeno	Vector	Enfermedad
Virus del dengue	Mosquito <i>Aedes aegypti</i> y otras especies <i>Aedes</i> .	Fiebre del dengue, dengue hemorrágico.
Virus chikungunya	<i>Aedes aegypti</i> , <i>A. albopictus</i>	Fiebre chikungunya
Virus encefalitis japonés B	Mosquitos Colex.	Encefalitis japonesa
Plasmodium spp. (protozoa- Sporozoa)	Mosquitos Anopheles	Malaria
<i>Onchocera volvulus</i> (lombrices parasitarias)	Moscas negas Simulium.	Oncocercosis o ceguera de los ríos
<i>Wuchereria bancrofti</i> , <i>Brugia</i> spp. (lombrices paracitarias)	Aedes, Anopheles y mosquitos Culex	Filariasis linfática (elefantiasis)
<i>Schistosoma</i> spp. (Lombrices Paracitarias).	Caracoles acuáticos	Esquistosomiasis (Bilharziasis)
<i>Dracunculus medinensis</i> (lombriz parasitaria)	Pulgas de agua (Daphnia) - Cyclops	Dracunculiasis

Existen varios términos para referirse a las enfermedades vinculadas al agua, las enfermedades relacionadas al agua -históricamente- son las más estudiadas. Una enfermedad relacionada al agua es definida como significativa o con efectos ampliamente adversos en la salud humana, como la muerte, incapacidad, enfermedades o desórdenes, cau-

sados directa o indirectamente por la condición, o cambios en la calidad o cantidad de cualquier cuerpo de agua (Figura 11).

Las causas relacionadas a estas enfermedades incluyen microorganismos, parásitos, toxinas y químicos que contaminan el agua. Los metales pesa-

**Figura 11. Formas de transmisión de patógenos relacionados con el agua.**



# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Tabla 5. Enfermedades infecciosas relacionadas a la creación de presas y su nivel de variación en función del cambio ecológico.**

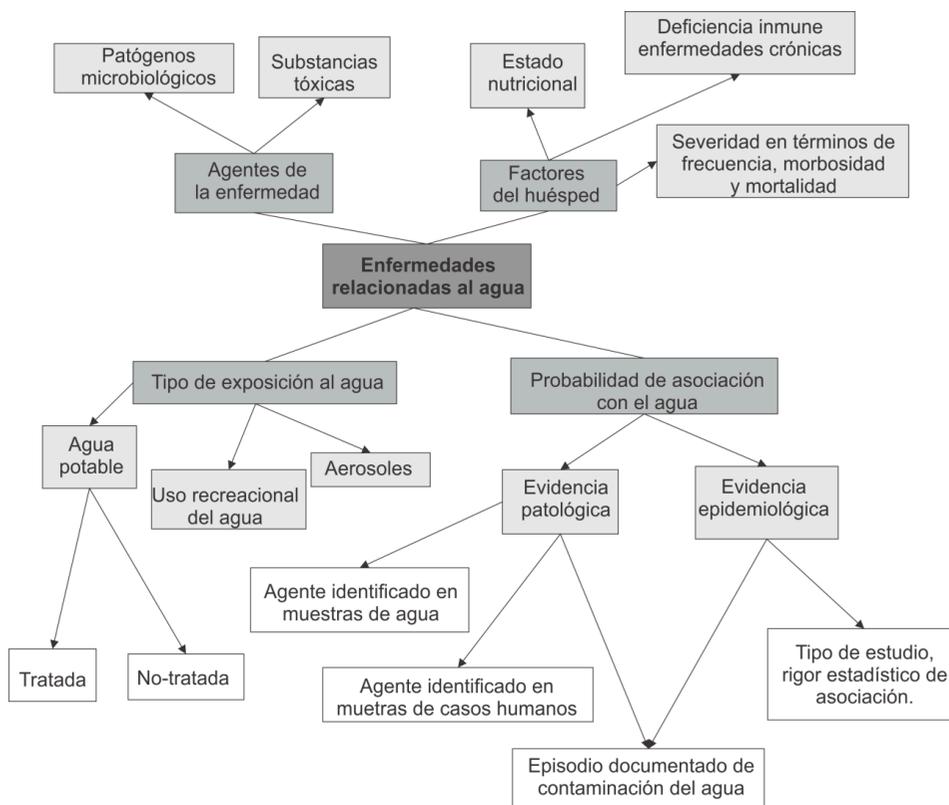
Enfermedad	Casos por año	Variación esperada por el cambio ecológico
Malaria	350 millones	Muy alta
Filariasis linfática	120 millones	Baja
Esquistosomiasis	120 millones	Muy alta
Oncocercosis	18 millones	Moderada
Encefalitis japonesa	30,000-50,000	Alta
Fiebre del Rif Valley	27,500	Alta
Criptosporidiosis	1,798	Alta

dos se originan tanto por fuentes naturales como antropogénicas y puede acumularse en los sedimentos de los reservorios (Shine *et al.*, 1995; Kidd *et al.*, 2007) impactando la cadena alimenticia acuática y conducir a serios problemas de salud (Loska y Wiechula, 2003). Otros términos incluyen “enfermedades por vectores en agua”, los cuales implican el esparcimiento directo y es usado

principalmente para referirse a una enfermedad causada por patógenos microbiológicos o contaminantes químicos en el agua, de ellas las que poseen mayor incidencia en la creación de presas se presentan en la Tabla 5.

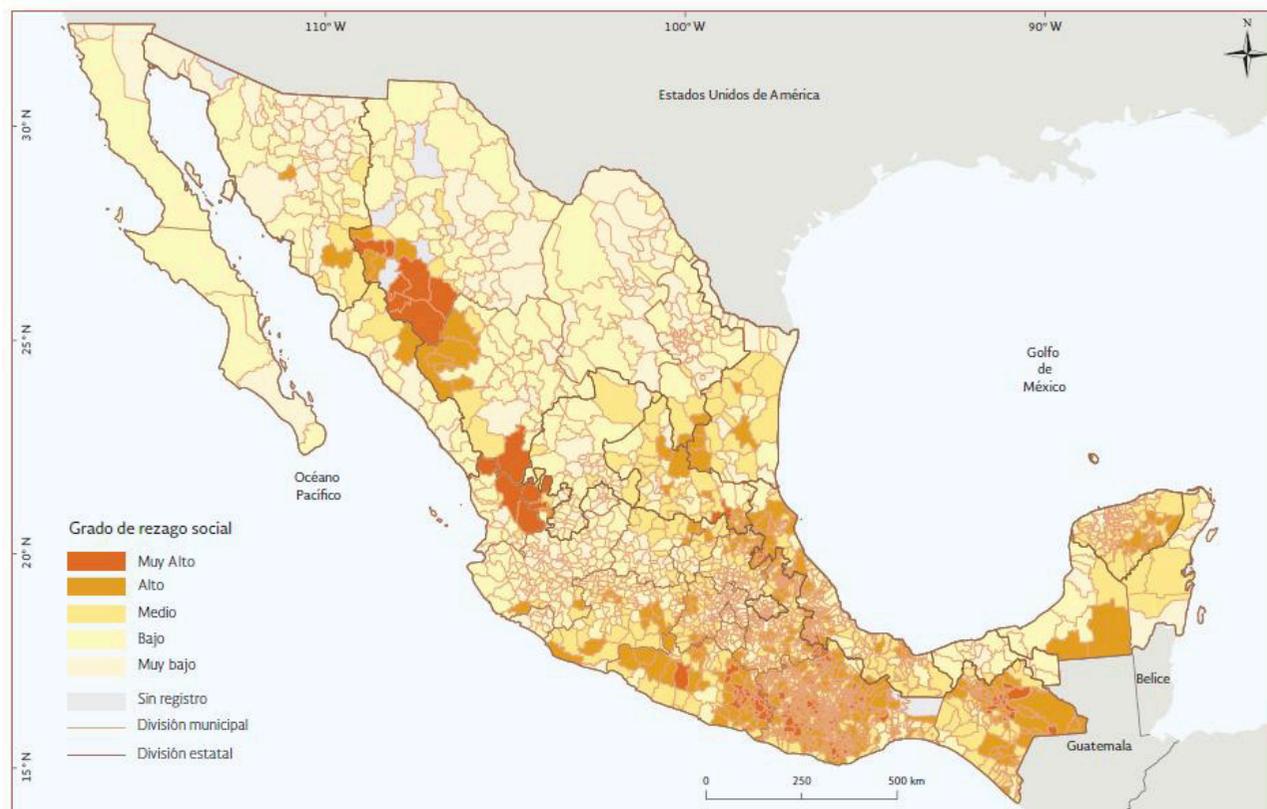
El agua es un requerimiento fundamental para la nutrición y para mantener una buena salud. His-

**Figura 12. Relaciones vinculadas en la clasificación de las enfermedades relacionadas con el agua.**



# Capítulo 1

**Figura 13. Grado de rezago social por municipio, 2015, (CONEVAL, 2016).**



Fuente: Elaborado con base en CONEVAL (2016).

tóricamente, las enfermedades relacionadas con el agua han sido uno de los principales problemas de salud tanto para los países desarrollados como los que están en desarrollo. Los factores del huésped, como lo es el estado de nutrición, son importantes en términos de la supervivencia del individuo, comunidad y país; si por ejemplo el país tiene niveles altos de malnutrición, deficiencia inmunitaria, o una mortalidad significativa debido a patógenos relacionados al agua (Figura 12).

En México existen varios municipios con importante rezago social (Figura 13), lo cual muestra la condición y factores relacionados con los posibles huéspedes, como son: estado nutricional, mortalidad, morbilidad y frecuencia de enfermedades y deficiencias en infraestructura y de marginación. Muy Alto, para el caso del municipio Del Nayar, bajo - medio para Acaponeta, bajo - medio para Rosamorada y de bajo a medio para Ruíz.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Tabla 6. Tasa de mortalidad por cada 100,000 habitantes durante los años 2004 y 2015 por estados de la República Mexicana. (SINA-Conagua, web).**

Entidad Federativa	Tasa de mortalidad por cada 100 000 habitantes 2004	Tasa de mortalidad por cada 100 000 habitantes 2015
Aguascalientes	8.37	2.37
Baja California	11.46	3.33
Baja California Sur	6.52	1.45
Campeche	11.71	2.39
Coahuila de Zaragoza	7.14	3.74
Colima	9.67	4.74
Chiapas	44.66	31.23
Chihuahua	11.79	7.05
Ciudad de México	11.11	4.17
Durango	7.19	9.12
Guanajuato	16.31	5.00
Guerrero	18.45	9.78
Hidalgo	7.93	3.34
Jalisco	10.48	3.67
México	28.74	8.59
Michoacán de Ocampo	14.61	6.17
Morelos	14.04	5.24
Nayarit	12.92	14.71
Nuevo León	4.17	2.07
Oaxaca	33.19	15.92
Puebla	31.19	6.83
Querétaro	15.46	3.22
Quintana Roo	12.11	6.51
San Luis Potosí	15.86	5.34
Sinaloa	5.07	3.42
Sonora	9.43	5.27
Tabasco	21.15	5.81
Tamaulipas	6.55	2.61
Tlaxcala	24.51	4.02
Veracruz de Ignacio de la Llave	17.17	9.46
Yucatán	10.99	8.85
Zacatecas	14.76	3.99
<b>Total nacional</b>	<b>20.80</b>	<b>7.54</b>

CONAGUA. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA).

La Tabla muestra la tasa de mortalidad por cada 100,000 habitantes durante el año 2004 y 2015 por estado, donde los estados de Nayarit y Durango presentan un incremento en la tasa de mortalidad debido a enfermedades relacionadas con el agua.

## Resultado de la aplicación de la metodología propuesta

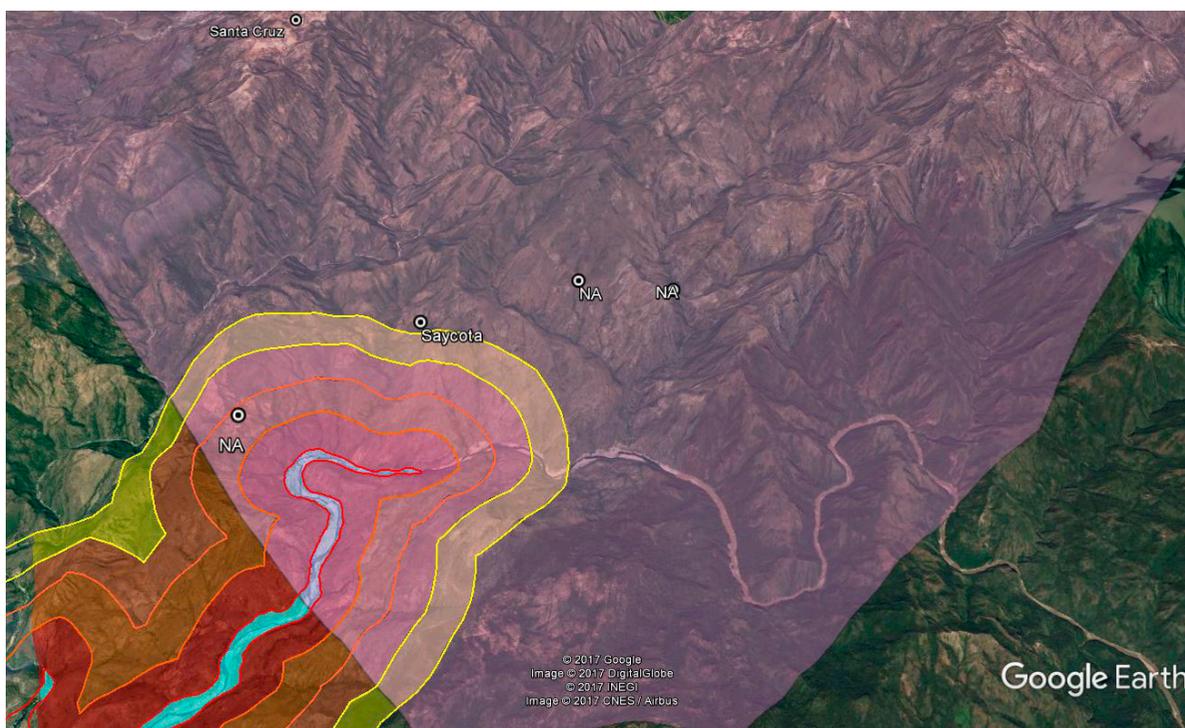
El valor del Potencial Marsh para la configuración del proyecto Las Cruces es de 9.76 m<sup>-1</sup>, que corresponde a un valor medio. El valor indica la posibilidad

de encontrar varios criaderos, localizados y con un territorio o segmentos restringidos debido a la topografía del terreno, sobre todo, en lugares donde la pendiente transversal del terreno (en relación a la corriente principal) es suave. Toda columna de agua con una profundidad menor a 2 m es un sitio favorable para el desarrollo de vectores.

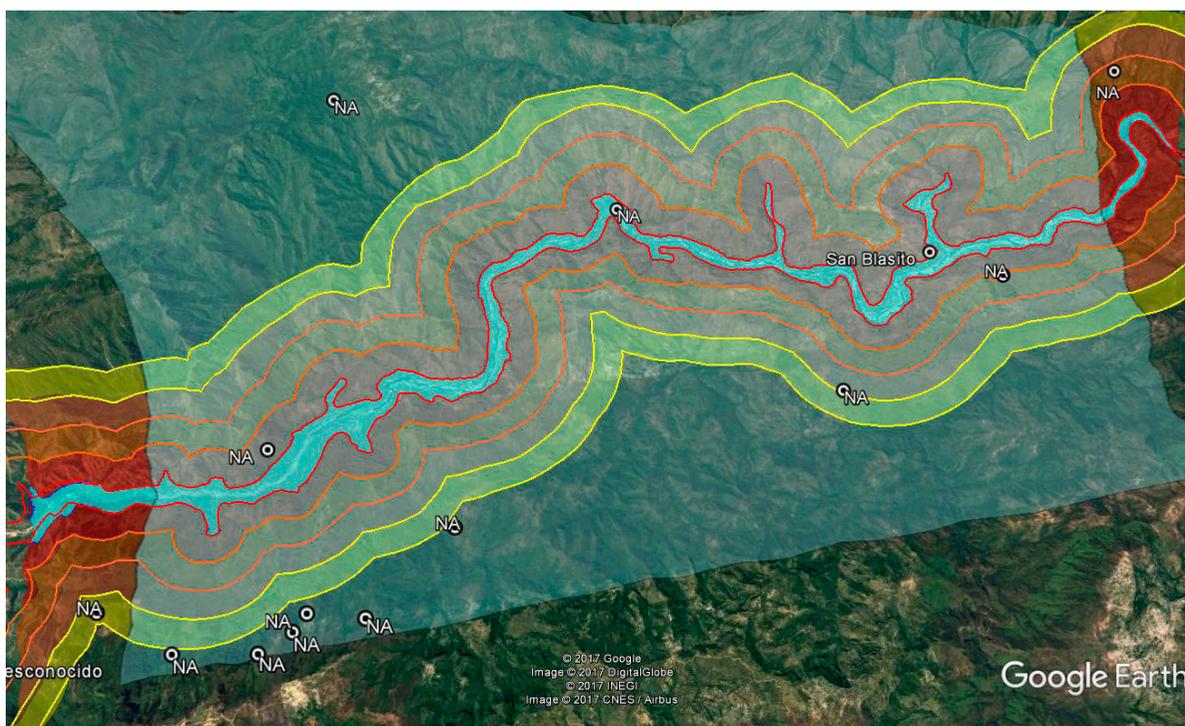
Suponiendo que cualquier segmento del perímetro del reservorio pudiera albergar un criadero, se determina el área de riesgo, que corresponde a 2 km para los mosquitos. El resultado se presentan en las Figuras 14-16.

## Capítulo 1

**Figura 14. Comunidad de Saycota (morado) y las curvas que se muestran cada 500 m e indican el área con riesgo de ser picados por mosquitos y contraer alguna de las enfermedades transmitidas por estos. En esta comunidad se encuentra en riesgo el Núcleo Agrario (NA) y el poblado de Saycota.**

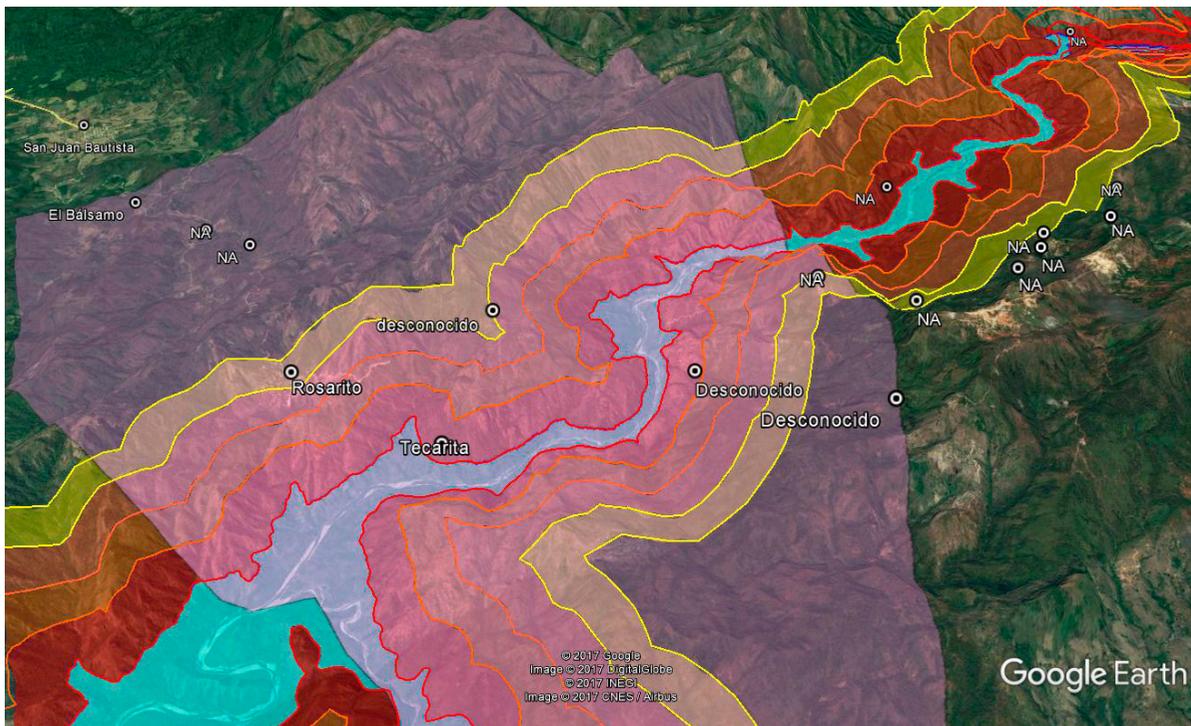


**Figura 15. Comunidad de San Blasito (verde) y las curvas que se muestran cada 500 m e indican el área con riesgo de ser picados por mosquitos y contraer alguna de las enfermedades transmitidas por estos. En esta comunidad se encuentra en riesgo seis Núcleos Agrarios (NA) y el poblado de San Blasito.**



## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Figura 16. Comunidad de Rosarito (morado) y las curvas que se muestran cada 500 m e indican el área con riesgo de ser picados por mosquitos y contraer alguna de las enfermedades transmitidas por estos. En esta comunidad se encuentra en riesgo tres Núcleos Agrarios (NA) y los poblados: Rosarito y Tecarita.**

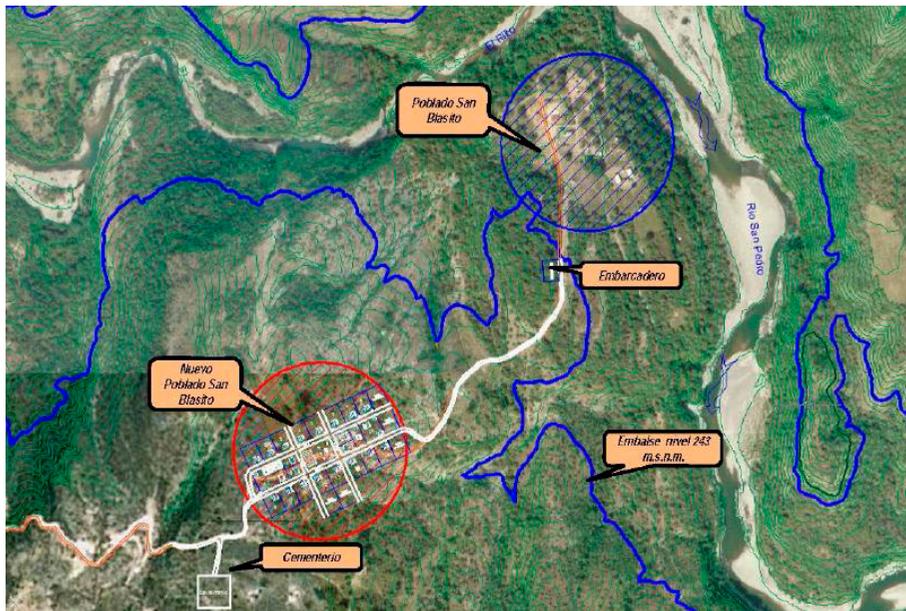
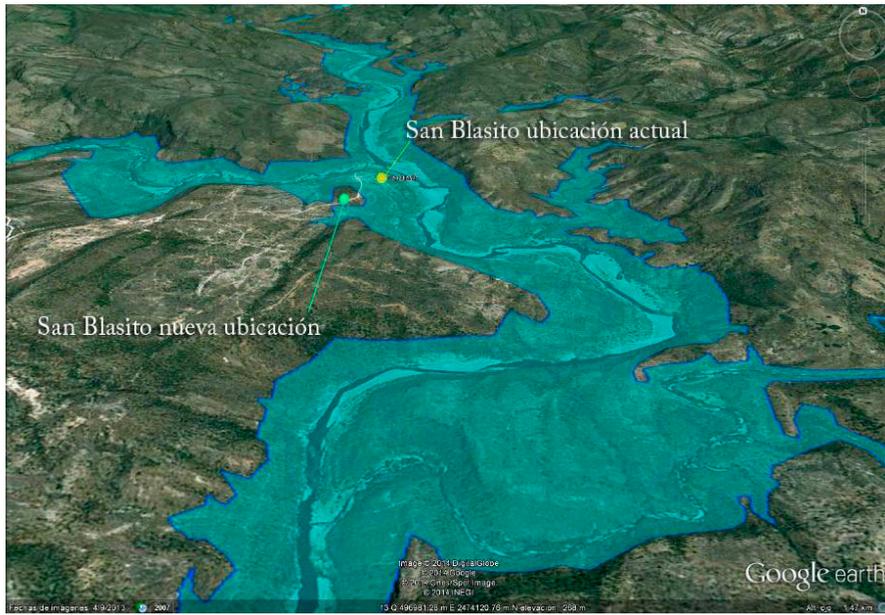


Aunque el poblado de San Blasito se reubicaría, este se encontrará en un sitio de alto riesgo de desarrollo de enfermedades transmitidas por vectores, ya que

se encuentra dentro del área de peligro de 2 km indicado por las curvas de nivel de las Figuras 14-16 (Figura 17).

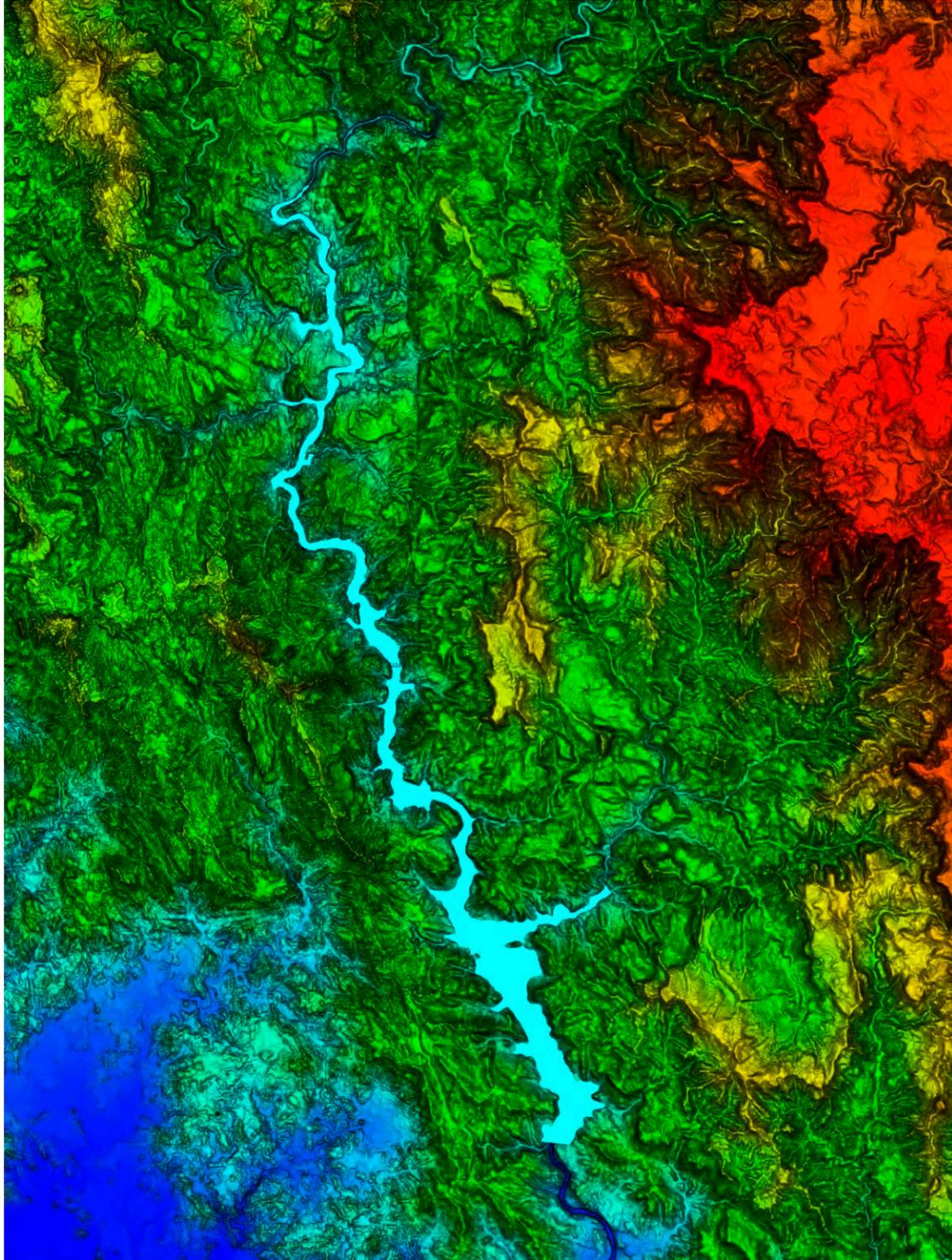
# Capítulo 1

Figura 17. Reubicación del poblado San Blasito y su posición relativa con el nuevo nivel del agua.



## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Figura 18. Modelo digital de elevación y el NAMO (nivel de aguas máximas ordinarias).



# Capítulo 1

## Referencias

- Egré D. y Milewski J.C., (2002)** – The diversity of hydro-power projects, *Energy Policy*, 30:1225-1230 pp.
- Lecornu J., 1998** – Dams and water management paper presented to the Conférence Internationale Eau et Développement Durable, Paris.
- Polimeni J.M., Iorgulescu R. I. y Chandrasekara R., 2014** – Trans-border public health vulnerability and hydroelectric projects: The case of Yali Falls Dam, *Ecological Economics*, 98:81-89 p.
- McCully P., 1996** – *Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams*. London, Zed Books.
- Williams G.P. y Wolman G.M., 1985** – *Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers*, Geological Survey Professional Paper - 1286, 94 p.
- William R. J.** – *Dams and disease - Ecological design and health impacts of large dams, canals and irrigation systems*, E & FN Spon, Taylor and Francis Group, London and New York, 592 p.
- Carter R.C., Brook J.M. y Jewsbury J.M., 1990** – Assessing the impact of small dams on vector borne disease, *Irrigation and Drainage Systems*, 4:1-16 pp.
- Carter R. C., Brook J.M. y Jewsbury J.M., 1989** – Assessing the impact of small dams on vector borne disease, *Irrigation and Drainage Systems*, 4:1-16 pp.
- Káiser J., Caldas de Castro M., Maltese F.M., Bos R., Tanner M., Singer H.B. y Utzinger J., 2005** – Effect of irrigation and large dams on the burden of malaria on a global and regional scale, *The American Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 72(4):392-406 pp.
- Kidd P, Dominguez-Rodriguez M, Diez J, Monterroso C (2007)** – Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge. *Chemosphere* 66:1458–1467.
- Shine JP, Ika RV, Ford TE (1995)** – Multivariate statistical examination of spatial and temporal patterns of heavy metal contamination in New Bedford Harbor marine sediments. *Environ Sci Technol* 29:1781–1788
- Loska K, Wiechuła D (2003)** – Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere* 51:723–733.
- Dick GW, Kitchen SF, Haddow AJ.** – Zika virus isolations and serological specificity. *Trans R Soc Trop Med Hyg.* 1952;46:509–20. DOI: 10.1016/0035-9203(52)90042-.
- Dick GW.** – Zika virus pathogenicity and physical properties. *Trans R Soc Trop Med Hyg.* 1952;46:521–34. DOI: 10.1016/0035-9203(52)90043-6.
- SS, 2017** – Casos confirmados de síndrome congénito asociado a zika-México 2017, Secretaría de Salud, Desglose de Casos Sx Congénito, página web.
- Moore DL, Causey OR, Carey DE, Reddy S, Cooke AR, Akinkugbe FM, et al.** – Arthropod-borne viral infection of man in Nigeria, 1964–1970. *Ann Trop Med Parasitol.* 1975;69:49–64.
- Fagbami AH.** – Zika virus infections in Nigeria: virological and seroepidemiological investigations in Oyo State. *J Hyg (Lond).* 1979;83:213–9.

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

- Mexico Secretariat of Health.** – Zika virus disease confirmed cases. EW 34 of 2017. (Accessed on 7 September 2017). Available at: <http://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/zika-informacion-relevante>
- Mexico Secretariat of Health.** – Zika virus disease confirmed cases. EW 34 of 2017. (Accessed on 7 September 2017). Available at: <http://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/zika-informacion-relevante>.
- Pan American Health Organization / World Health Organization.** – Zika - Epidemiological Report Mexico. September 2017. Washington, D.C.: PAHO/WHO; 2017.
- Cerda LJ, Valdivia CG, Valenzuela BMT, Venegas LJ.** – Cambio climático y enfermedades infecciosas: un nuevo escenario epidemiológico. *Rev Chil Infect* 2008; 25: 447-452
- Gage KL, Burkot TR, Eisen RJ, Hayes EB.** – Climate and vectorborne diseases. *Am J Prev Med* 2008; 35: 436-450.
- Githeko AK, Lindsay SW, Confalonieri UE Patz JA.** – El cambio climático y las enfermedades transmitidas por vectores: un análisis regional. *Revista Virtual REDESMA* 2009; 3:21-38
- Gómez-Dantés H.** – El dengue en las Américas: un problema de salud regional. *Salud Pública Mex* 1991; 33:347-355
- Ramírez-Zepeda MG, Velasco-Mondragón HE, Ramos C, Peñuelas JE, et al.** – Caracterización clínica y epidemiológica de los casos de dengue: experiencia del Hospital General de Culiacán, Sinaloa, México. *Rev Panamá Salud Pública* 2009; 25: 16-23.
- Riojas-Rodríguez H, Hurtado-Díaz M, Litai-Moreno G, Santos-Luna R, Texcalac- Sangrador JL.** – Estudio piloto sobre escenarios de riesgos en salud asociados al cambio climático en regiones seleccionadas de México. Instituto Nacional de Ecología/Instituto Nacional de Salud Pública. Cuernavaca, Mor. 2007.
- Riojas-Rodríguez H, Hurtado-Díaz M.** – Cambio climático e impactos regionales en la salud humana de México. *Rúbricas. Revista de la Universidad Iberoamericana Puebla* 2010; 0:34-41.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.** – Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones. Serie ¿Y el medio ambiente? México. 2009.
- Secretaría de Salud.** – Subsecretaría de Prevención y Promoción de la Salud (2008).
- Programa de Acción Específico 2007-2012** – Dengue. México.
- Tabachnick WJ.** – Challenges in predicting climate and environmental effects on vector-borne disease epistystems in a changing world. *The Journal of Experimental Biology* 2010; 213: 946-954
- Valdés-Miró V, Díaz-Castillo AO, Borrell-Ferrer MC, Cabrerias-Cabreras SV.** – Estratificación para la vigilancia entomológica del dengue. *Rev Cubana Med Trop* 2009; 61:1-9
- Berberian G, Rosanova MT.** – Impacto del cambio climático en las enfermedades infecciosas. *Arch Argent Pediatr* 2012; 110:39-45
- Rogers DJ, Randolph SE.** – Climate change and vector-borne diseases. *Advances in Parasitology* 2006; 62:345-381.

# Capítulo 2

## Identificación de los aspectos ambientales de la presa y canales

### Introducción

Las presas hidroeléctricas cambian el ecosistema y la fauna aguas arriba y abajo de la planta hidroeléctrica (Commerford, 2011). Las presas hidroeléctricas producen cantidades significativas de CO<sub>2</sub> y metano, y en algunos casos, producen más de estos gases GEI en comparación a una planta que consume combustibles fósiles (Graham-Rose, 2005). Phillip Fearnside, biólogo conservacionista en el Instituto Nacional de Investigación en el Amazonas señala que los últimos resultados sugieren que una planta hidroeléctrica en un clima tropical, durante sus primeros diez años de vida, emitirá cuatro veces más carbono que una central que funcione con combustibles fósiles (Giles, 2006). Por tanto, es necesario agregar un impuesto a estos, debido al costo de los daños sociales y los GEI, para poder representar los costos “reales” implicados en la creación de una central hidroeléctrica, ya que las centrales hidroeléctricas no son ni económicas ni limpias.

En cuanto a la seguridad, los problemas asociados con las presas se asocian a las grandes cantidades de agua tras la presa; por lo que siempre existe el potencial riesgo ante actos te-

rroristas, accidentes y lluvias extraordinarias, etc., o debido a errores de construcción o diseño. Por ejemplo: una mala construcción, como ocurrió en Banqiao en la provincia de Henan, China, mató a aproximadamente 26,000 personas directamente al romperse en 1975 y otras 145,000 murieron debido a enfermedades y hambruna. Se estima que en total murieron 230,000 personas (Goldstein, 2011), y la vida de más de 10 millones de personas se vio afectada (Xinhao, 2005).

Además de los GEI, la reubicación tanto de animales y personas, así como otros costos asociados, supone uno de los mayores problemas que no son considerados en los países en desarrollo; como es el caso de México. Este cambio o ajuste, debería considerar la reubicación de poblaciones, la pérdida de terrenos ancestrales, el impacto de daños étnicos y éticos. Por ejemplo, las presas han desplazado entre 40 - 80 millones de personas en todo el mundo, y la mayoría de estas personas nunca pudieron retomar sus vidas. En varios casos, las presas han conducido a daños significativos e irreversibles, como son la pérdida de especies y ecosistemas. Por si fuese poco, las medidas para mitigar estos impactos comúnmente no son exitosas (Bosshard, 2008).

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

## Descripción del proyecto

El Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, posee una capacidad instalada de 240 MW, que presenta una generación media anual de 783 GWh. La obra está constituida prácticamente por cinco obras:

1. Obras de desvío del río (túneles y ataguías).
2. Obras de contención para embalsar el agua (cortina).
3. Obras de excedencias (vertedor) para el derrame del agua en caso de avenidas extraordinarias.
4. Obras de generación de energía eléctrica

(obra de toma, conducción, casa de máquinas, desfogue y subestación eléctrica).

5. Obras de infraestructura (caminos, oficinas, campamentos).

Cada obra posee una serie de presiones sobre el sistema fluvial, lo cual conllevará al desarrollo de variaciones, tanto positivas como negativas sobre el sistema, lo que se denomina como Impactos; los cuales, pueden o no estar conectados, por lo que su dinámica o desarrollo con el resto del sistema, puede potencializar o neutralizar. La Tabla 1 compila las principales obras o modificaciones, y la serie de impactos a los que están sujetos, sin embargo la CFE no presenta ningún estudio sobre la dinámica del sistema, ni de su cuantificación y cualificación.

## Capítulo 2

**Tabla 1. Compilación de las diversas actividades que presionan el sistema fluvial y la consecuencia de dicha presión. En cuanto al Estado y Respuesta, la CFE no da mayor detalle, solo en algunos casos plantea una forma de mitigar el impacto.**

Para cuando el sistema fluvial se encuentra en su estado natural		
Presión	Consecuencia	Respuesta
Creación y operación de embalse	Disminución de la calidad del agua en el embalse.	No existen respuestas concretas, solo ideas bosquejadas. Además, no pueden ser llevadas a cabo sin medir e identificar cada variable.
	Disminución de la calidad del agua corriente arriba.	
	Disminución de la calidad del agua corriente abajo.	
	Pérdida de agua en el sistema por el aumento de la tasa de evaporación en el embalse.	
	Disminución de la capacidad de regulación del microclima.	
	Alteración de las características fisicoquímicas del agua turbinada.	
	Pérdida de biodiversidad por la modificación relevante de los ciclos biogeoquímicos en el embalse.	
	Aumento de la presión estática - sismicidad inducida.	
	Riesgo por inundación debido a la ruptura o grietas en la cortina, debido a los movimientos sísmicos o falla.	
	Disminución de la disponibilidad de agua durante la temporada de lluvias.	
	Incremento de los eventos de hipoxia y anoxia, así como la generación de gases de efecto invernadero (GEI).	
	Cambio en los servicios del ecosistema de regulación del clima y del microclima, la vegetación constituye un termoregulador natural mediante su interacción con la atmósfera al modificar el contenido de humedad atmosférica.	
	Aumento en la evaporación y la generación de GEI.	
	Cambio en la humedad de los suelos por la regulación del flujo y el control de inundaciones.	
	Pérdida de regulación de playas, del clima y microclima.	
	Estratificación del embalse principal y el embalse de la PCR.	
	Disminución de la calidad del agua en el embalse de la PCR.	
	Modificación de los ciclos bioquímicos.	
	Modificación en el hábitat.	
	Pérdida de la biodiversidad y limitación de la capacidad productiva por la modificación relevante de los ciclos biogeoquímicos en el embalse.	
Reemplazo de especies de peces nativos por introducidas o adaptables a las nuevas condiciones del sistema.		
Generación de gases de efecto invernadero a partir de la degradación de la biomasa inundada.		
Competencia de especies, fauna acuática.		
Inundación de ecosistemas terrestres ripario	No se profundiza.	

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Modificación del servicio del ecosistema	Falla o modificación de los servicios del ecosistema.	No existen respuestas concretas, solo ideas bosquejadas. Además, no pueden ser llevadas a cabo sin medir e identificar cada variable.
	Falla o modificación del servicio de regulación.	
	Modificación de la humedad y salinidad del suelo.	
	Cambio en la dinámica de las lagunas costeras.	
	Cambio en la acumulación de detritos orgánicos.	
Cambio en uso de suelos		
Creación de un embalse	Inundación de viviendas.	
	Acumulación parcial de sedimentos finos en fondo y laterales del embalse.	
	Interrupción de los patrones de migración de especies.	
	Pérdida o debilitamiento de especies.	
	Afectación al ciclo de vida y/o comportamiento de las especies.	
	Erosión costera.	
	Reducción de la parte de sedimentos y nutrientes a los suelos y ecosistemas de la llanura costera.	
	Cambios en la geomorfología fluvial.	
Canales artificiales y distritos de riego	Retención de sedimentos medianos a gruesos y modificación de procesos morfogenéticos en planicies de inundación y humedales.	
	Interrupción de los patrones de dispersión y deposición de germinoplasma y nutrientes.	
	Pérdida o debilitamiento de especies.	
	Disminución de la parte de sedimentos a la llanura inundable y tierras de cultivo.	
Ampliación del canal principal de riego	Afectación al ciclo de vida y/o comportamiento de las especies.	
	Interrupción de los patrones de dispersión y deposición de germinoplasma y nutrientes.	
	Pérdida o debilitamiento de especies.	
	Disminución de la parte de sedimentos a la llanura inundable y tierras de cultivo.	
Ampliación del distrito de riego #49	Afectación al ciclo de vida y/o comportamiento de las especies.	
	Interrupción de los patrones de dispersión y deposición de germinoplasma y nutrientes.	
	Pérdida o debilitamiento de especies.	
	Disminución de la parte de sedimentos a la llanura inundable y tierras de cultivo.	
Cambio del régimen natural del caudal diario por el régimen artificial	Afectación al ciclo de vida y/o comportamiento de las especies.	
	Aumento de la velocidad del flujo y de los procesos erosivos y depósito.	
	Pérdida de hábitats acuáticos y riparios	
Alteración de los patrones de flujo de agua dulce hacia las lagunas costeras	Pérdida de la capacidad de inundación del río.	
	Aumento de la velocidad del flujo y de los procesos erosivos y depósito.	
	Pérdida de hábitats acuáticos y riparios	
	Pérdida de la capacidad de inundación del río.	

## Capítulo 2

Modificación a la red hidrológica superficial en la llanura media y baja	Cambio del régimen natural de caudal diario por un régimen artificial de caudal diario.	No existen respuestas concretas, solo ideas bosquejadas. Además, no pueden ser llevadas a cabo sin medir e identificar cada variable.
	Cambio del régimen del caudal estacional por un régimen artificial de caudal estacional.	
	Alteración de los escurrimientos y cauce natural del río.	
	Reducción y/o eliminación del caudal de los canales secundarios del río San Pedro.	
Red hidrológica superficial en la llanura media y baja	Cambio del régimen natural del caudal diario por un régimen artificial de caudal diario.	
	Cambio del régimen natural del caudal estacional por un régimen artificial de caudal estacional.	
	Cambio en la humedad y salinidad de los suelos.	
	Cambio en la dinámica de las lagunas costeras.	
	Acumulación de detritos orgánicos (ramas, troncos, etc.).	
	Cambio en la velocidad y distribución del agua.	
Cambio en los patrones de escurrimiento y principales puntos de descarga del río San Pedro en el sistema lagunar.	Cambio en el ciclo y movimiento de nutrientes.	
	Cambio del régimen natural del caudal estacional por un régimen artificial de caudal estacional.	
	Cambio en la humedad y salinidad de los suelos.	
	Cambio en la dinámica de las lagunas costeras.	
	Acumulación de detritos orgánicos (ramas, troncos, etc.).	
	Cambio en la velocidad y distribución del agua.	
	Cambios en los patrones del agua en los sistemas lagunar y costa.	
Cambios en los patrones de migración de las especies acuáticas.		
Deforestación	Cambios en la red hidrológica superficial de la planicie costera.	
	Pérdida de vegetación.	
	Pérdida de servicios del ecosistema.	
	Pérdida de hábitats.	
Extracción de materiales (bancos)	Aumento de la erosión debido a la eliminación de la cobertura vegetal.	
	Acumulación parcial de sedimentos finos en fondo y laterales del embalse.	
	Cambios en las componentes de la biodiversidad - número de especies, abundancia relativa, diversidad intraespecífica, diversidad funcional, distribución espacial, diversidad vertical, resiliencia ecológica.	
	Modificación en los servicios del ecosistema y en los sistemas de regulación de la calidad del agua.	
	Cambio en la calidad fisicoquímica del agua mediante el cambio en la abundancia de sedimentos finos debido a las extracciones y excavaciones.	
	Extracción de recursos naturales.	
	Extracción de rodados de las márgenes del río San Pedro.	

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Instalación de campamentos y sitios de obra	Acumulación parcial de sedimentos finos en fondo y laterales del embalse.	No existen respuestas concretas, solo ideas bosquejadas. Además, no pueden ser llevadas a cabo sin medir e identificar cada variable.
	Extracción de recursos naturales.	
	Extracción de rodados de las márgenes del río San Pedro.	
Construcción de caminos de acceso	Acumulación parcial de sedimentos finos en fondo y laterales del embalse.	
	Extracción de recursos naturales.	
	Extracción de rodados de las márgenes del río San Pedro.	
Creación de canales artificiales y distritos de riego	Cambio en el régimen natural de caudal diario por un régimen artificial de caudal diario.	
	Cambio del régimen natural de caudal estacional por un régimen artificial de caudal estacional.	
	Aumento en la magnitud y frecuencia de los pulsos de inundación en la planicie costera durante la temporada de estiaje.	
	Cambio en la humedad y salinidad de los suelos.	
	Disminución en la calidad del agua que se recarga en acuíferos.	
	Disminución o modificación de hábitats.	
	Apertura y dragado de canales y barras costeras.	
Cambio de uso de suelo; deforestación.		
Aumento de la carga de sedimentos durante las horas de turbinado	Cambio de régimen natural de caudal diario por un régimen artificial de caudal diario.	
	Cambio en las componentes de la biodiversidad, número de especies, abundancia relativa, diversidad intraespecífica, diversidad funcional, distribución espacial, diversidad vertical y resiliencia ecológica.	
	Cambio en los servicios al ecosistema.	
	Aumento de la turbidez.	
Construcción de pozos profundos	Avance de intrusión salina.	
	Disminución de la recarga de acuíferos.	
	Aumento de la sobreexplotación del agua subterránea.	
	Cambio en la dinámica hídrica de las lagunas costeras.	
	Disminución de la calidad de los acuíferos.	
Creación de una franja árida en las laderas del embalse principal por fluctuaciones del nivel	Pérdida de vegetación debido a la precipitación de sales durante los cambios de cota del embalse.	
	Cambio en los ecosistemas y sus servicios.	
	Cambio en el paisaje.	
	Cambio en el servicio de fertilización de los suelos.	
Aumento del caudal en el tramo entre la cortina principal y la PCR durante las horas de turbinado	Cambio del régimen natural del caudal diario por un régimen artificial de caudal diario y estacional del agua, influyendo en la humedad y salinidad de las lagunas costeras, la acumulación de detritos orgánicos.	
	Cambio en la calidad del agua.	
	Detrimiento en los servicios de aprovisionamiento del hábitat.	

## Capítulo 2

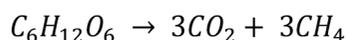
Distribución del caudal en el tramo entre la cortina principal y la PCR durante las horas en que no opera la presa	Cambio del régimen natural de caudal diario por un régimen artificial de caudal diario.	No existen respuestas concretas, solo ideas bosquejadas. Además, no pueden ser llevadas a cabo sin medir e identificar cada variable.
	Pérdida de especies acuáticas y terrestres.	
	Pérdida de los servicios del ecosistema de regulación del flujo diario y estacional del agua influyendo en la humedad y salinidad de los suelos.	
	Cambio en la dinámica hídrica de las lagunas costeras.	
	Acumulación de detritos orgánicos (ramas, troncos, etc.).	
	Cambio en la velocidad y distribución del agua.	
	Cambio en la calidad del agua.	

### Correcciones a proponer a CFE

A continuación se presentan algunas recomendaciones para que CFE atienda y el cálculo del costo e impacto del PH Las Cruces sea adecuado, presentando aquellas con mayor impacto y costo, y que no han sido atendidas con la metodología adecuada.

#### Sobre los gases de efecto invernadero (GEI)

La producción de metano se realiza mediante la descomposición de la glucosa, sustancia que se encuentra en todas las plantas que se descomponen en CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.



La biomasa de las plantas varía en distintos ecosistemas, por ejemplo: 7 kg C m<sup>-2</sup> en pasto a 20 kg C m<sup>-2</sup> en bosque de lluvia tropical, también el suelo contiene carbono (bajo en los trópicos y alto en áreas boreales) (Kelly *et al.*, 1994). Los cálculos realizados para el PH Las Cruces, incorpora varios valores “sugeridos” y no considera que el suelo tam-

bién contiene carbono, por lo que no se tiene una correcta estimación de la biomasa, ni del carbono en los suelos para el cálculo del CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> (CO<sub>2</sub>e) generado.

El cálculo presentado por CFE (anexo del capítulo II.1) es inadecuado para el grado de afectación que el PH Las Cruces representa. Danny Cullenward, experto en política energética de la universidad de Stanford señala: “una presa libera entre 95 a 122 millones de toneladas de metano por año” (Giles, 2006), por lo que las 21,729 t de CO<sub>2</sub>e + 73,745 t CO<sub>2</sub> son una aproximación muy pequeña, comparada con el verdadero impacto, como sugiere Giles (2006). La equivalencia de CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub>e considerado por CFE es de 20, sin embargo el potencial de calentamiento global del CH<sub>4</sub> va de 20 - 40 veces el del CO<sub>2</sub> (por g), por lo que el porcentaje de CH<sub>4</sub> liberado es importante, y no se debe considerar un único valor en este cálculo (Rosenberg *et al.*, 1997). Además, se debe estimar la producción de GEI con base en datos más recientes y midiendo en campo las especies vegetales, la densidad y tipos de suelo, para considerar una cantidad real de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Sería interesante que las especies descritas en el documento Flora IV.1.2. Caracterización Vegetación.pdf, Flora IV.1.3. Evaluación Vegetación Riparia.pdf y Flora IV.1.5 Uso de Suelo.pdf, pudieran ser complementada con el valor kg C, para posteriormente calcular  $\text{kg C m}^{-2}$  en función del % del área impactada, en lugar del método empleado.

Además en el documento IV.3.1 Calidad del Agua Síntesis.pdf, queda registrado que la concentración de carbono orgánico total (COT) en el río San Pedro es hasta seis veces más que la concentración en estiaje (126.2 mg/l contra 18.1 mg/l), debido al lavado de los suelos de la cuenca. Por lo que sería importante considerar el aporte de COT en un futuro, y estimar los GEI generados por este.

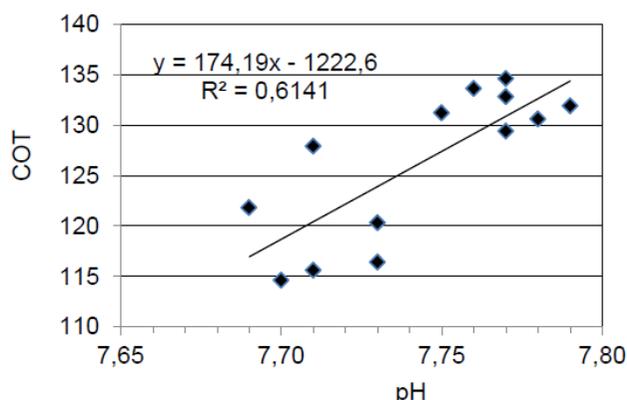
## Sobre la acidificación del agua

El estudio realizado por CFE señala la correlación lineal entre el COT y otros parámetros medidos. La correlación directa entre el COT y el pH (Figura 1), se explica mediante la liberación del  $\text{CO}_2$ , por la actividad heterotrófica microbiana de degradación de la materia orgánica (IV.4.1 Informe Final COT San Pedro-Santiago\_3.pdf).

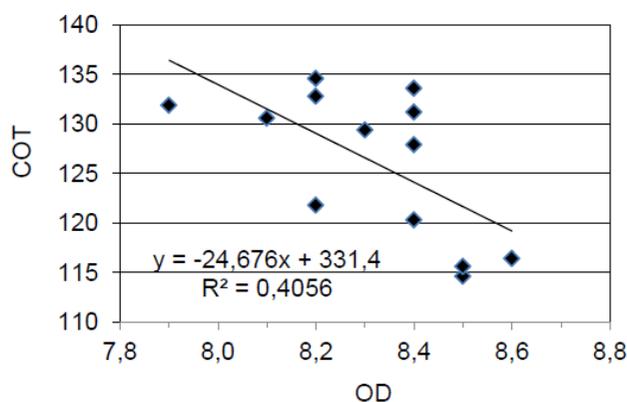
Por otra parte, el oxígeno disuelto (OD) también se ve afectado por el COT, como se muestra en la Figura 2.

Es importante estudiar más a fondo esta variabilidad, ya que el sustento de la vida o la calidad del hábitat que representará el embalse depende de este factor en gran medida. Por otra parte, la temperatura tam-

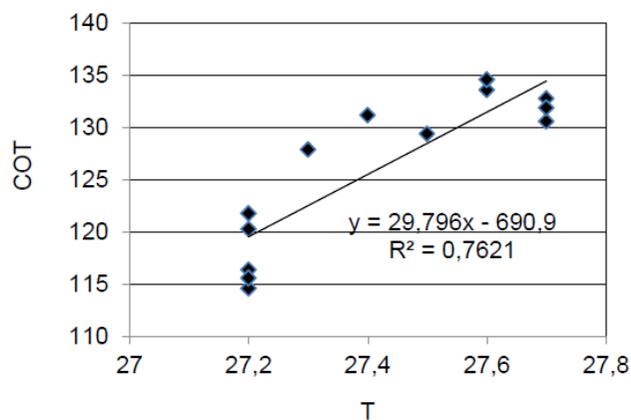
**Figura 1. Correlación entre COT y el pH del río San Pedro durante el 27/09/2012.**



**Figura 2. Correlación entre el COT y el OD del río San Pedro durante el 27/09/2012.**



**Figura 3. Correlación entre COT y temperatura (T). El COT aumenta directamente proporcional a T, es importante señalar el aumento en COT con tan solo 0.6 grados.**



bién cambiará al incrementar la superficie del espejo del agua del embalse, lo que provocará que aumente considerablemente la evaporación (Figura 3).

Debe considerarse el cambio en la dinámica en el hábitat aguas arriba y abajo de la presa, ya que se verá fuertemente impactado y es importante hacerlo para un periodo amplio considerando los valores extremos de temperatura, evaporación, etc.

El carbono orgánico total (COT) varía de 339,625 a 431,252 toneladas de carbono al año en periodo de lluvias y en estiaje de entre 61,766 a 125,664 toneladas carbono/año.

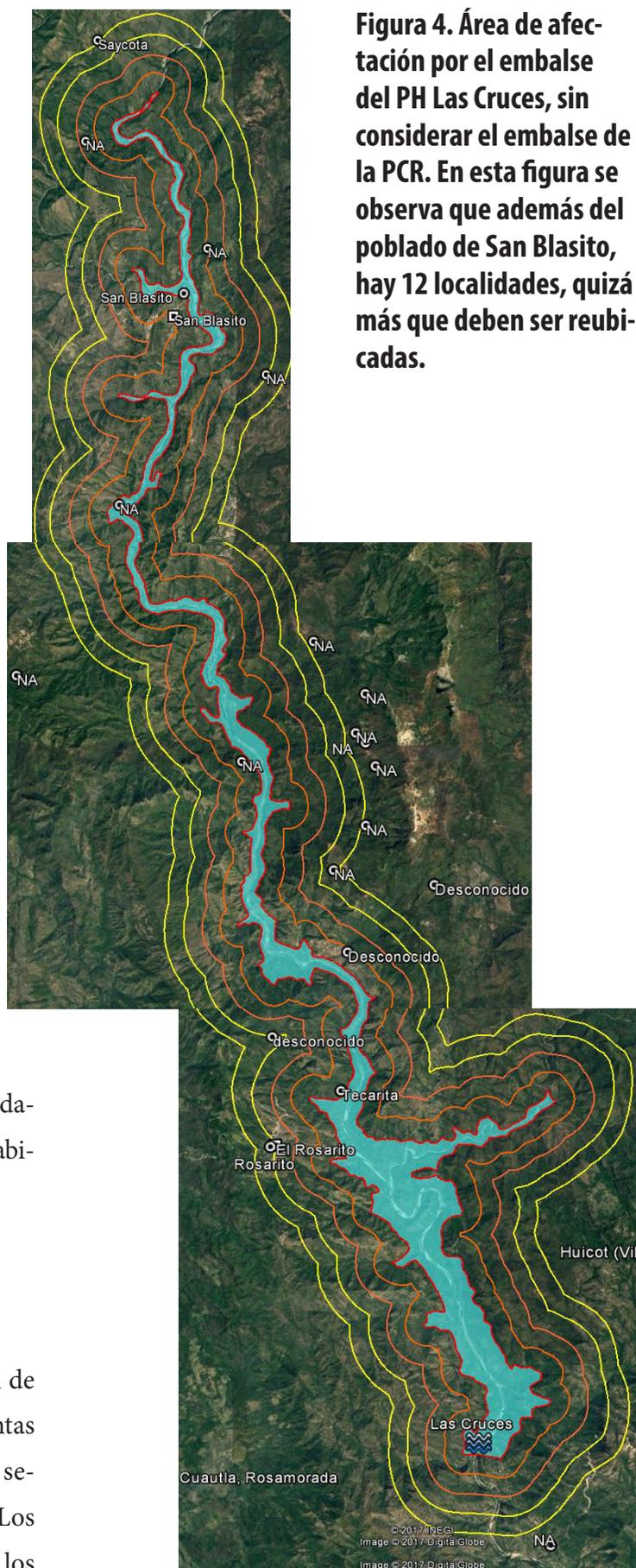
### Sobre la reubicación de las poblaciones

Las poblaciones deben ser reubicadas en un área fuera del alcance de los vectores que transmiten enfermedades, ya que estos podrán reproducirse e infectar a la población. Además, debe considerarse todos los impactos sobre la población que se identifican en el Capítulo 1.

Existen varios núcleos agrarios (NA) y comunidades que deben ser reubicadas y no solo a los habitantes de poblado de San Blasito (Figura 4).

### Sobre la erosión - depósito de sedimentos

Los modelos basados en la Ecuación universal de la pérdida de suelos (USLE) son las herramientas más empleadas para predecir la producción de sedimentos (Kinnell, 2004; Yoder *et al.*, 2004). Los cuales se crearon con la finalidad de ayudar a los



## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

agricultores a minimizar las pérdidas del suelo en los campos de cultivo (Wischmeier y Smith, 1978). Los modelos USLE predicen la erosión en un campo delimitado, sin considerar la interacción con campos adyacentes.

Varios investigadores y desarrolladores han recomendado evitar el empleo de los modelos basados en USLE a escala de cuenca (Wischmeier y Smith 1978; Risse *et al.*, 1993; Kinnell, 2004). Sin embargo, estos continúan empleándose pese a las recomendaciones (Kinnell, 2004; Yoder *et al.*, 2004), y CFE no es la excepción. Esfuerzos previos para validar los modelos USLE recaen en la estimación de la erosión en unidades de terreno individuales y en la predicción de la generación de sedimentos en corrientes pequeñas, con resultados exitosos, sin embargo a escalas regionales no ha sucedido así (e.g. Angimal *et al.*, 2003), ya que los modelos basados en USLE no se encuentra suficientemente verificados a dicha escala (Trimble and Crosson, 2000).

La estimación de la erosión en cuencas es estimada comúnmente con base en estaciones de muestreo ubicadas aguas abajo, las cuales permiten observar y relacionar las tasas de erosión medida, mediante métodos empíricos. Por su parte los métodos USLE predicen las tasas de erosión con base en las características, forma, tamaño de la cuenca y la pendiente del canal de mayor grado (Vanoni, 1975; Maner, 1958; William y Berndt, 1972). En un experimento conducido por Van Rompaey *et al.*, (2003) para validar la certeza de las estimacio-

nes de las ecuaciones basadas en USLE empleando datos de 98 cuencas a escala regional en Europa, indican que estos proveen predicciones pobres comparándolos con la tasa recuperada por las estaciones de muestreo.

Una de las principales dificultades para emplear estos modelos de erosión a escala regional, es incorporar la complejidad inmersa dentro de esta escala, así como el detalle que requieren los factores que constituyen las ecuaciones de los modelos USLE. Dentro de estos factores, los que poseen mayor influencia en la estimación en las tasas de erosión son los factores referentes a la topografía (LS), ya que estos controlan el factor de erosividad por lluvia (R), la cual está fuertemente asociada a la influencia topográfica. Los patrones de cubierta también se asocian con las diferencias topográficas de la cuenca, un bajo valor de (C) se asocia con suelos empleados para cultivo, los cuales fomentan la inestabilidad y favorecen la erosión. La constante de cubierta (C) ignora la interacción con otros factores geográficos, como las variaciones en los patrones climáticos y el desarrollo de la vegetación a lo largo de los gradientes latitudinales (Risse *et al.*, 1993). Las discrepancias en la escala del modelo también afecta la confianza para caracterizar la erodibilidad del suelo (K).

Otra limitación significativa es que estos modelos únicamente consideran la generación de sedimentos por efectos de los flujos de escorrentía (Prosser *et al.*, 2001), ignorando los procesos de erosión

## Capítulo 2

entre las corrientes del drenaje en el sistema, la erosión de las laderas de las corrientes y la resuspensión del material depositado, los cuales pueden contribuir significativamente con la carga de sedimentos (Trimble, 1997). La erosión de los bancos de corriente puede ser predominantemente importante, especialmente en los sitios donde los depósitos estratificados se encuentran mal consolidados (Campo y Desloges, 1994; Nagle *et al.*, 2007).

La importancia de los procesos hidrológicos y su control sobre los procesos de transporte de sedimentos, los cuales son conducidos por las lluvias, sugieren que la escala de tiempo que emplean los modelos USLE pueden ser inapropiados para predecir la descarga de sedimentos en cuencas, ya que estos predicen tasas promedio de erosión anual en términos superiores a 20 años, tiempo considerado como superior en comparación con los eventos extremos que son despreciables a escala de cuenca, los cuales suelen reconfigurar el sistema fluvial o por lo menos partes de este (e.g., Jordan *et al.*, 1997).

Otra razón de la débil relación entre los resultados predictivos de los modelos USLE y el sedimento registrado empíricamente es la insuficiente relación reflejada entre los patrones del clima en los factores de entrada de los modelos USLE, lo cual resulta en tasas inconsistentes de entrega de sedimentos en relación con la cantidad e intensidad de las lluvias (e.g., Lenzi *et al.*, 2003; Kinnell, 2004). Por tanto es importante evitar el empleo de los modelos USLE para obtener predicciones a escala de cuenca y considerar sus resultados como argumentos válidos para administrar cuencas (Kinnell, 2004; Trimble and Crosson, 2000).

Por tanto se propone que CFE emplee otra metodología o realice la medición físicamente y la posterior modelación.

Las recomendaciones de corrección señaladas para la CFE, modificarán el costo inicial del proyecto, mismos que se presentan en el último Objetivo de este trabajo.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

## Referencias

- Commerford M., 2011** – Hydroelectricity: the negative ecological and social impact and the policy that should govern it, energy economics and policy, ETH (Swiss Federal Institute of Technology), Zurich, 27 p.
- Graham-Rowe D., 2005** – Hydroelectric Power's Dirty Secret Revealed, *New Scientist* 4.
- Giles J., 2006** – Methane Quashes Green Credentials of Hydropower, *Nature* 444:7119, 524-525 p.
- Goldstein L., 2011** – Safe' power an oxymoron, *Toronto Sun*, 20 March 2011, ([www.torontosun.com](http://www.torontosun.com)).
- Xinhau, 2005** – After 30 years, secrets, lessons of China's worst dams burst accident surface, *People's Daily* ([english.people.com.cn](http://english.people.com.cn)).
- Bosshard P., 2008** – The World commission on Dams Framework-A Brief Introduction, *International Rivers*, 29, ([www.internationalrivers.org](http://www.internationalrivers.org)).
- Kelly A.C., Rudd M.W.J., St. Louis V.L. y Moore T., 1994** – Turning attention to reservoir surfaces, a neglected area in greenhouse studies, *Earth and Space Science News*, EOS- 75(29): 332-333 pp.
- Rosenberg D.M., Berkes F., Bodaly R.A., Hecky R.E., Kelly C.A., y Rudd J.W.M., 1997** – Large-Scale Impacts of Hydroelectric Development, *Environmental Reviews*, 5(1):27-54pp.
- Angima, S.D., D.E. Stott, M.K. O'Neil, C.K. Ong. And G.A. Weesies. 2003** – Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenyan highland conditions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 97:295-308.
- Campo, S.H., and J.R. Desloges. 1994** – Sediment yield conditioned by glaciation in rural agricultural basin of Southern Ontario, Canada. *Phy. Geogr.* 15:495-515
- Jordan, T.E., D.L., Correll, and D.E. Weller. 1997** – Relating nutrient discharges from watersheds to landuse and streamflow variability. *Water resour. Res.* 33:2579-2590.
- Kinnell, P.I.A. 2004** – Sediment delivery ratios: A misaligned approach to determining sediment delivery from hillslope. *Hydrol. Processes* 18:3191-3194.
- Lenzi, M.A., L. Mao, and F. Comiti. 2003** – Interannual variation of suspended sediment load and sediment yield in an alpine catchment. *Hydrol. Sci. J.* 48:899-915.
- Maner, S.B. 1958** – Factor affecting sediment delivery rates in the Red Hills physiographic area. *Trans. Am. Geophys.* 39:669-675.
- Nagle, G.N., T.J. Fahey, J.C. Ritchie, and P.B. Woodbury. 2007** – Variations in sediment sources and yields in the Finger Lakes and Catskills regions of New York. *Hydrol. Processes* 21:828-838.
- Prosser, I.P., I.D. Rutherford, J.M. Olley, W.J. Young, P.J. Wallbrink, and C.J. Morgan. 2001** – Large-scale patterns of erosion and sediment transport in river networks, with examples from Australia. *Mar. Freshw. Res.* 52:81-99.
- Risse, L.M., M.A. Nearing, A.D. Nicks, and J.M. Laflen. 1993** – Error assessment in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:825-833.
- Trimble, S.W. 1997** – Contribution of stream channel erosion to sediment yield from an urbanizing watershed. *Science* 278:1442-1444.

## Capítulo 2

**Trimble, S.W., and P.Crosson. 2000** – U.S. soil erosion rates-Myth and reality. *Science* 289:248- 250.

**Vanoni, V.A. 1975** – Sedimentation engineering 54. ASCE manuals and reports on engineering practices. ASCE, Reston, VA.

**Wischmeier, W.H., and D.D. Smith. 1978** – Predicting rainfall-erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook #507. USDA, Washington, DC.

**Yoder, D.C., G.R. Foster, G.A. Weesies, K.G. Renard, K.K. McCool, and J.B. Lown. 2004** – Evaluation of the RUSLE soil erosion model. P. 107-116. In J.E. Parsons *et al.* (ed.) Agricultural non-point source water quality models: Their use and application. Southern Cooperative Series Bull. No. 398.

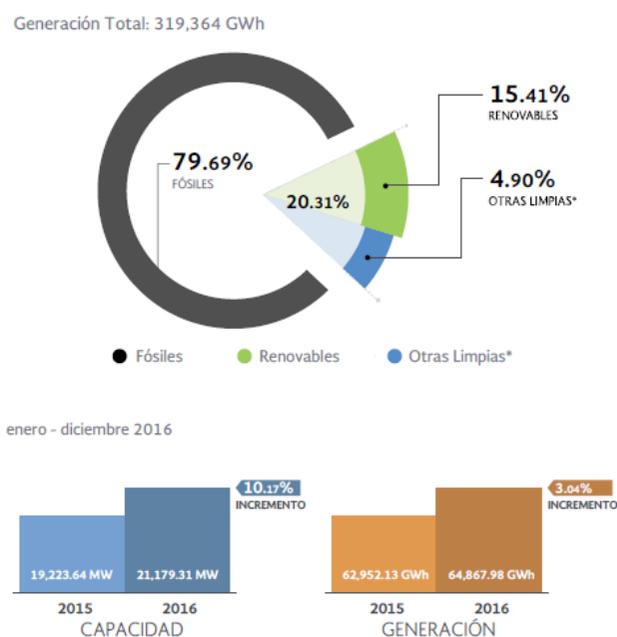
# Capítulo 3

## Estudio de la interdependencia energética

### Introducción

La generación de energía mediante hidroeléctricas está afectada por fluctuaciones extremas del flujo de agua, al igual que de los parámetros que rodean la administración y usos del suministro de agua para generar electricidad; el potencial de afectar la operación de las presas por disminución de la producción de electricidad, puede resultar en altos costos de energía, tanto a los utilitarios<sup>(1)</sup> como a los usuarios finales. Otras variables relacionadas al clima como la temperatura del aire, la precipitación, y las condiciones de escorrentía, también impactan el futuro del suministro de agua y sus demandas, y puede poseer repercusiones operacionales sobre las presas y los utilitarios que dependen de la generación de energía mediante las hidroeléctricas, ya que la energía producida en hidroeléctricas es derivada de la fuerza que produce el movimiento del agua. Las operaciones de hidroeléctricas también son afectadas indirectamente por los cambios en la temperatura del aire, humedad y patrones del viento, que pueden cambiar la calidad del agua y la dinámica del reservorio. Por ejemplo, los reservorios con una gran área superficial son más propensas a experimentar una mayor evaporación, la cual afecta la disponibilidad del agua para todos los usos, incluyendo la generación de electricidad.

**Figura 1. Distribución de la capacidad instalada en México 2016.**



\*Otras Limpias: Nuclear, Cogeneración Eficiente, Frenos Regenerativos y Licor Negro

### Comportamiento de la matriz energética limpia-renovable del país durante el año 2016

Durante el 2016 el 20.31% de la energía eléctrica fue generada con fuentes limpias. La capacidad instalada creció 10 %, llegando a 21,179 MW lo que representa el 28.81 % de la capacidad total nacional (SENER, 2017) (Figura 1).

Dentro de la clasificación de energías limpias, se en-

<sup>(1)</sup> El costo de la energía aumenta o disminuye en función de la productividad, ya que cada volt de energía no cuesta lo mismo, debido a lo complejo de la operación de una hidroeléctrica, en donde existen varios costos "fijos" de operación, mantenimiento y desgaste. Por tanto, de manera global, una alta producción diluye el costo de la energía.

## Capítulo 3

Figura 2. Capacidad instalada de energías renovables 2016.

18,503.20 MW

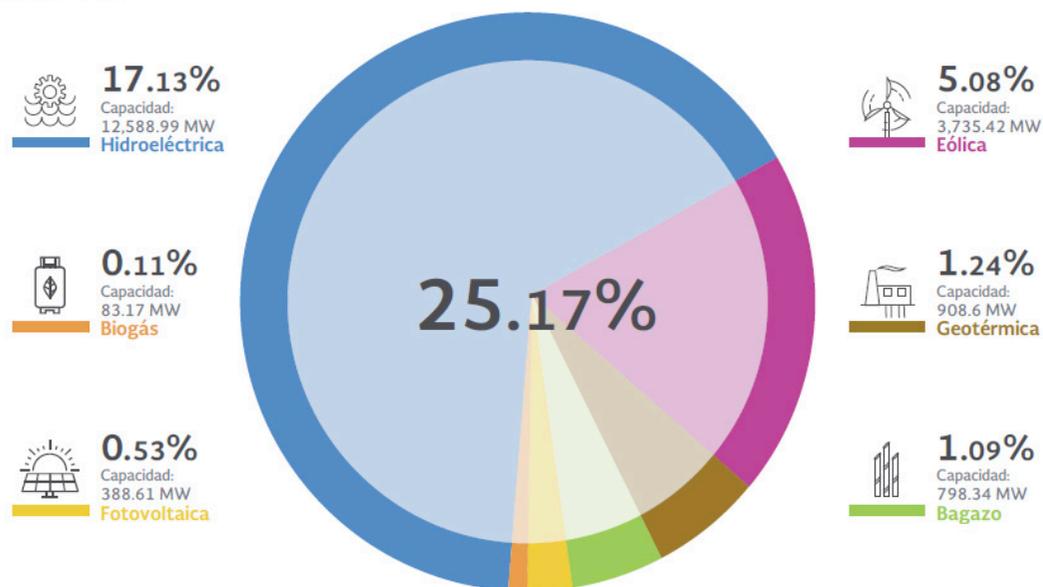
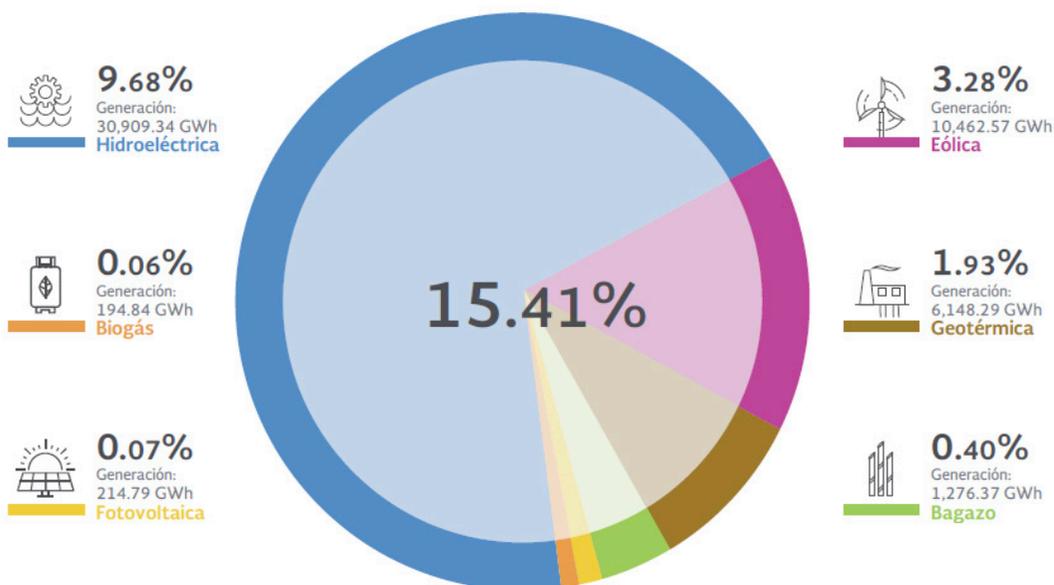


Figura 3. Generación con energías renovables 2016.

49,206.20 GWh



cuentran las energías renovables, las cuales en México poseen la conformación mostrada en la Figura 2.

El costo de la energía aumenta o disminuye en función de la productividad, ya que cada voltio de ener-

gía no cuesta lo mismo, debido a lo complejo de la operación de una hidroeléctrica, en donde existen varios costos “fijos” de operación, mantenimiento y desgaste. Por tanto, de manera global, una alta producción diluye el costo de la energía.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Figura 4. Crecimiento de la capacidad instalada en energías limpias (arriba), Crecimiento en Generación de Energía Limpia (abajo) para el periodo 2015-2016.**



La capacidad instalada de energías renovables, produjo durante el 2016 49,206.20 GWh, distribuidos como se muestra en la Figura 3.

El crecimiento de las energías limpias durante el periodo 2015-2016 en la capacidad instalada fue de 10.17 %, con incremento en la capacidad de centrales eólicas del 33 % (930 MW), y en las centrales fotovoltaicas se incrementó en 128.3 % (218 MW), por su parte la cogeneración<sup>(2)</sup> creció en 453 MW debido a nuevos proyectos, lo que significa un crecimiento del 78 % durante el 2016. En cuanto a la

generación para el mismo periodo, el incremento fue de 3.04 % (Figura 4). Las tecnologías con mayor crecimiento durante el 2016 fueron la eólica con 930 MW, seguido por la cogeneración eficiente con 452.96MW y posteriormente la fotovoltaica con 218.37 MW (SENER, 2017).

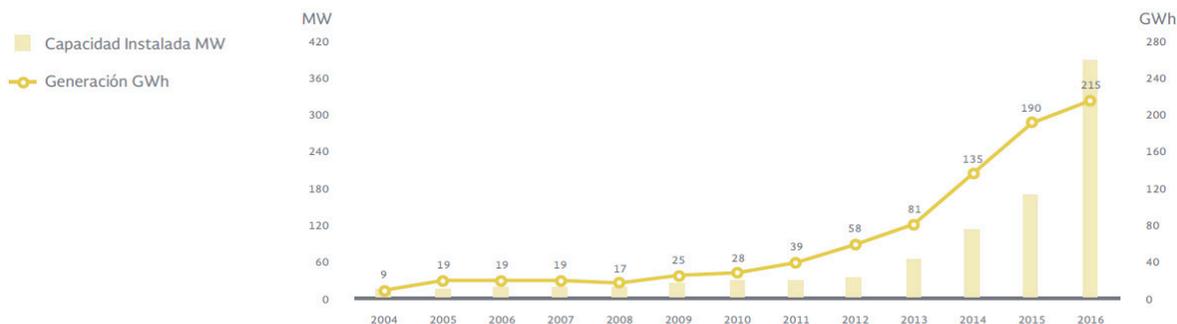
## Evolución histórica de la energía fotovoltaica

El PRODESEN 2016-2030, espera que para el año 2019 se tenga una capacidad instalada de 5,400 MW (2000 % veces más) (SENER, 2017) (Figura 5).

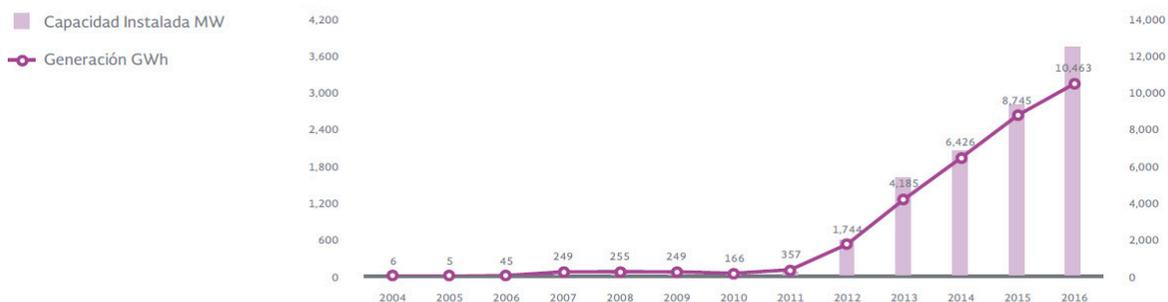
<sup>(2)</sup> La cogeneración se define como la producción simultánea de calor útil y electricidad a partir de un mismo combustible o fuente de energía primaria (www.cogeneramexico.org.mx, 2018).

## Capítulo 3

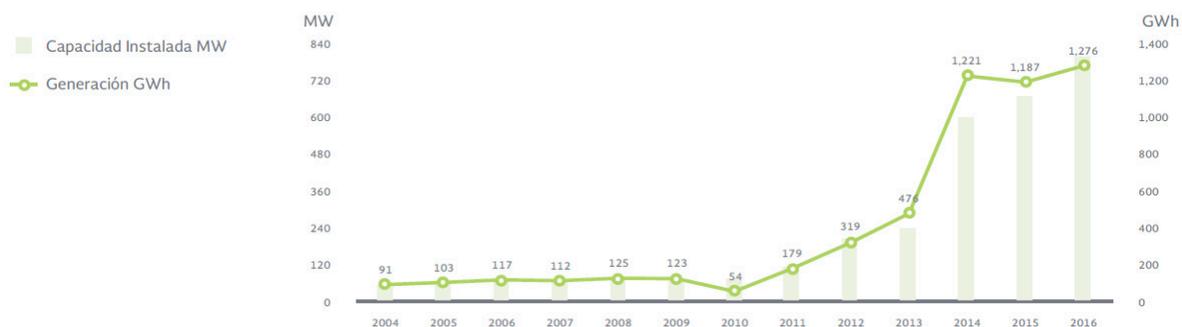
**Figura 5. Evolución histórica de la energía fotovoltaica.**



**Figura 6. Evolución histórica de la energía eólica.**



**Figura 7. Evolución histórica de la energía del bagazo de caña.**



### **Evolución histórica de la energía eólica**

El PRODESEN 2016-2030 espera que esta tecnología se triplique en los próximos años y sumar 2,456 MW al 2018 y 3,857 MW al 2019 (SENER, 2017) (Figura 6).

### **Evolución histórica de la energía del bagazo de caña**

La capacidad instalada de energía con esta tecnología aumentó en 128 MW durante el 2016, para un total de 798 MW. El crecimiento observado durante

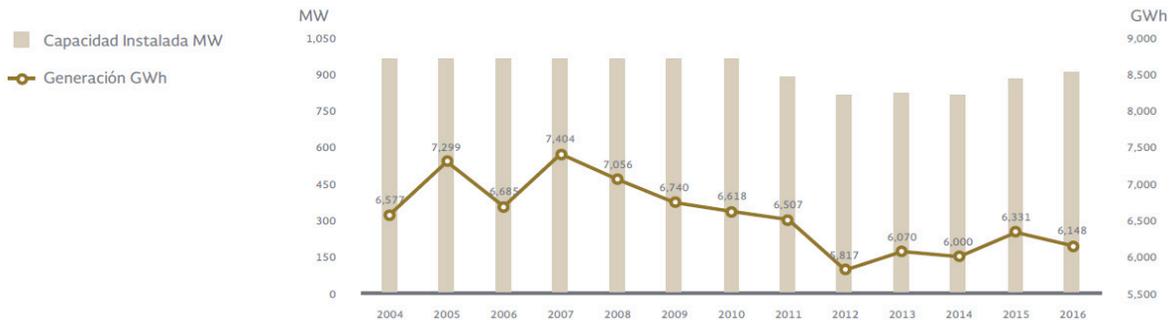
el 2014 se debió a un cambio metodológico o “de política” por parte de la Comisión Reguladora de Energía (CRE), ya que se incluyó a esta tecnología dentro del grupo de las energías limpias. El potencial de esta tecnología e industria para generar electricidad es de 1,500 MW adicionales (SENER, 2017) (Figura 7).

### **Evolución histórica de la energía geotérmica**

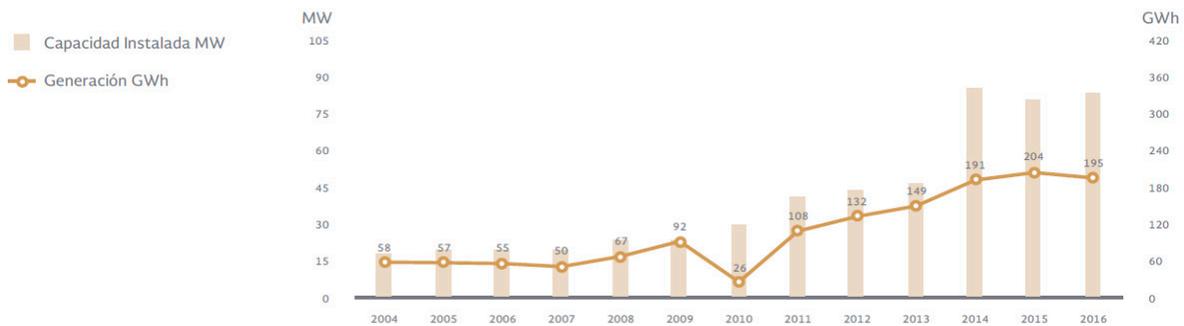
Esta tecnología posee un potencial probado y probable de 6,061 MW (SENER, 2017) (Figura 8).

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

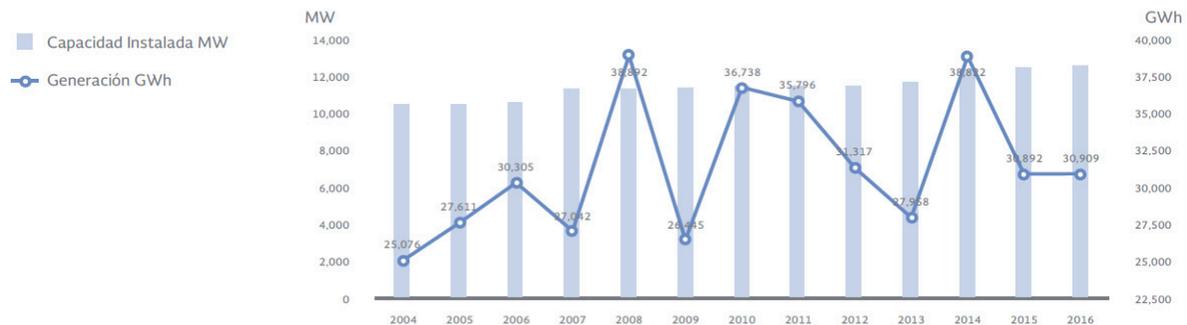
**Figura 8. Evolución histórica de la energía geotérmica.**



**Figura 9. Evolución histórica de la energía de biogás.**



**Figura 10. Evolución histórica de la hidroeléctrica.**



## Evolución histórica de la energía de biogás

México cuenta con un potencial de generación de 2,786 GWh, casi diez veces la capacidad de generación actual (SENER, 2017) (Figura 9).

## Evolución histórica de la hidroeléctrica

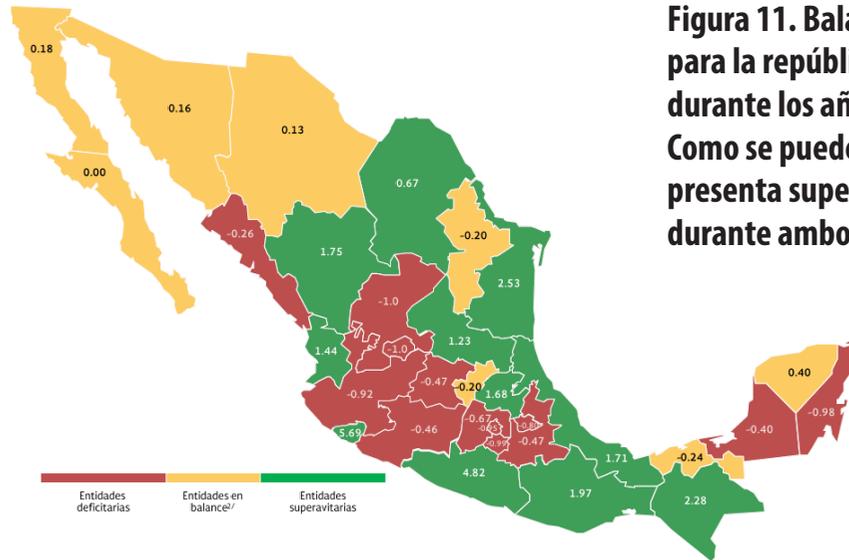
Durante el 2016 la hidroeléctrica aportó el 10 % de la generación total del país. Esta tecnología es altamente vulnerable frente al cambio

climático, lo que causa importaciones anuales en generación y obliga a buscar otros tipos de energías limpias y renovables, para garantizar el cumplimiento de las metas establecidas por la Ley de Transición Energética (SENER, 2017) (Figura 10).

Durante el 2015 y 2016 el balance de energía eléctrica por entidad federativa poseía la configuración que se muestra en la Figura 11.

## Capítulo 3

**Figura 11. Balance de energía para la república mexicana durante los años 2015 y 2016. Como se puede observar, Nayarit presenta superávit de energía durante ambos años.**



<sup>14</sup> Se determinó un Índice de Balance (IB) para cada entidad federativa, equivalente al valor del cociente, en el cual el numerador es la diferencia entre la generación de electricidad menos las ventas de energía eléctrica, y el denominador son las ventas de energía eléctrica. <sup>27</sup> El 25% de las entidades con menor IB (si es superavitaria) y mayor IB (si es deficitaria). Fuente: Elaborado por SENER con datos de CFE, CENACE y CRE.



Nota: Se determinó un Factor de Balance (FB) para cada entidad federativa, equivalente al valor del cociente, en el cual el numerador es la diferencia entre la generación de electricidad menos las ventas de energía eléctrica, y el denominador son las ventas de energía eléctrica. 1/ 25% de las entidades con menor FB (si es superavitaria) y mayor FB (si es deficitaria). Fuente: Elaborado por la SENER con datos de la CFE, el CENACE y la CRE.

### Seguridad energética y los proyectos hidroeléctricos en el contexto mexicano

El rápido crecimiento de la demanda energética pone como máxima prioridad la seguridad energética, aunado con el cambio climático, lo que ofrece áreas de oportunidad para diversificar las tecnologías empleadas para la producción de energía eléctrica

(SENER, 2017). La seguridad energética posee dos aspectos principales: la necesidad de reducir los efectos económicos adversos causados por la volatilidad de los precios, y el riesgo de interrupciones en el suministro y oferta de energía. La energía hidroeléctrica posee -asociadamente- grandes problemas de seguridad energética, debido a los cambios en los ciclos hidrológicos (como en los años de

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

El Niño) (SENER, 2017). La diversificación a través de las energías renovables contribuye en el nivel de la seguridad energética y en contar con precios más estables (SENER, 2017).

## Evaluación del nivel de interdependencia de Las Cruces en el Sistema Eléctrico Nacional

El rango de capacidad de las centrales eléctricas que se clasifican como generación distribuida va de 0.1 a 20 MW, y las principales tecnologías empleadas para tal fin son la solar, eólica, hidroeléctrica y biogás, la cogeneración eficiente y combustión interna (Gallegos y Rodríguez, 2015). La generación distribuida diversifica la matriz energética, aumenta la seguridad energética y disminuye el monto de inversión de infraestructura para el suministro de electricidad (transmisión) en el país (Gallegos y Rodríguez, 2015). Generar o almacenar la energía eléctrica a pequeña escala cerca del lugar de consumo, representa la alternativa para aumentar la competitividad del país, la cual se basa en estas razones:

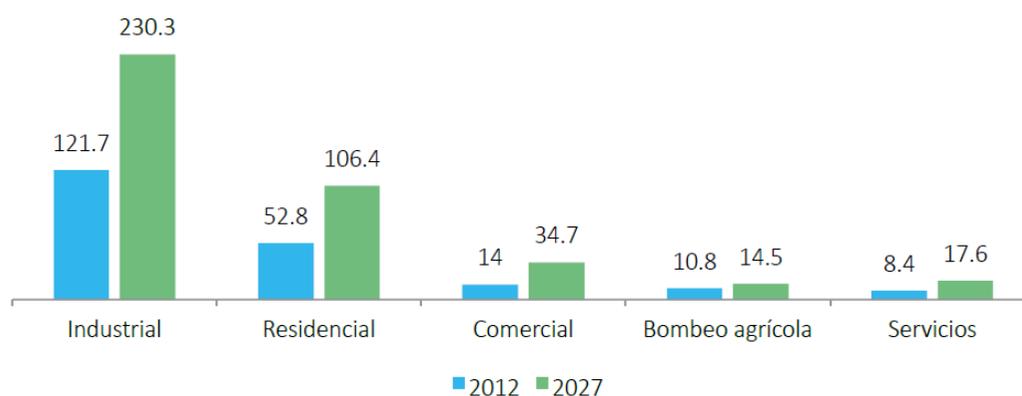
1. La energía eléctrica en México es cara, aun con los subsidios, es 25% más cara en promedio en comparación con Estados Unidos y en tarifa residencial de alto consumo hasta 150 % .
2. La red mexicana es altamente ineficiente, pues posee pérdidas de hasta el 17 % por transmisión y distribución.

3. El consumo de la energía está concentrada. Menos del 1 % de los usuarios de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) consumen el 58.6 % de la energía eléctrica del país.
4. La demanda en aumento, se tiene una tasa de crecimiento promedio anual por encima del 4 %, por lo que los temas de seguridad eléctrica son prioritarias.
5. México cuenta con una política de servicio universal, es decir, se busca proveer de energía a comunidades, zonas rurales o urbanas marginadas; muchas veces ubicadas en zonas remotas y con baja densidad poblacional, por lo que el desarrollo de infraestructura de transmisión puede ser evitado.
6. Ser competitivos, el gran potencial para producir con recursos renovables, hace que la generación distribuida pueda aumentar de 1.7 a 12 %.

Ejemplo de la aplicación de la generación distribuida es Alemania, que es uno de los países con mayor descentralización en su sector eléctrico, ya que durante el 2013 la capacidad instalada en generación distribuida fue de 86 GW, lo que representa el 48 % del total disponible. Esta acción ha mejorado la inversión en energías renovables, disminuido el impacto ambiental y aumentando la seguridad energética. Por su parte, el estado de California en Estados Unidos, en el año de

## Capítulo 3

**Figura 12. Ventas internas por sector (TWh).**



Fuente: Secretaría de Energía, 2013<sup>68</sup>

**Figura 13. Estimaciones de costos de interrupciones imprevistas por tipo de empresa.**

Industria	Costo (dólares/hora)
Comunicaciones celulares	41,000
Venta de boletos por teléfono	72,000
Reservaciones de aerolíneas	90,000
Operaciones de tarjetas de crédito	2,580,000
Operaciones bursátiles	6,480,000
Fabricación de micro-chips	60,000,000

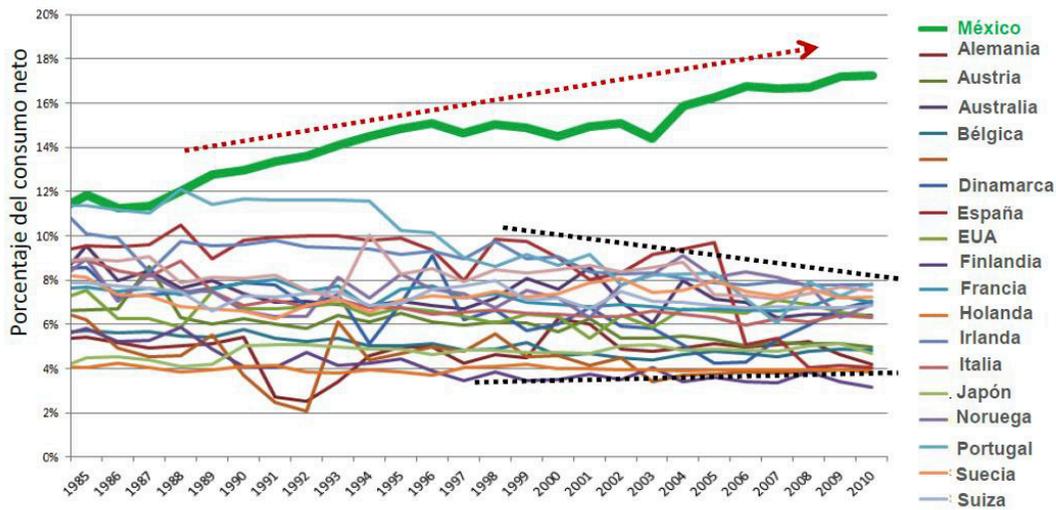
Fuente: Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2013<sup>63</sup>

2013 consumió 15,294 TWh, 5.5 % del total de su energía, a partir de sistemas de generación distribuida, medida que ha permitido la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y menores pérdidas de energía del sistema (Gallegos y Rodríguez, 2015). El desarrollo tecnológico y de empleos en un país depende del nivel de seguridad eléctrica del mismo, ya que la mayor recaudación depende de la industria (Figura 12) y del grado de tecnológico de la misma industria, por lo que un fallo eléctrico, significa pérdidas millonarias (Figura 13).

Poseer un sistema eléctrico robusto, es decir, con confiabilidad en el suministro eléctrico, es fundamental para el crecimiento de la economía, ya que diversas ramas de la industria requieren de un suministro con altos niveles de seguridad (Figura 13) debido a los altos costos que pudiera tener la pérdida de suministro eléctrico (Gallegos y Rodríguez, 2015), por lo que pudiera no solo aumentar la capacidad y producción de la matriz eléctrica mexicana, sino solucionar el serio problema de pérdidas de energía en el país, las cuales se encuentran muy por encima del promedio interna-

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Figura 14. Pérdidas de transmisión y distribución en diferentes países como porcentaje del consumo neto.**



Fuente: Debate Reforma Energética Senado Octubre 2013 (Senador Penchyna) con información CFE y diversas compañías eléctricas.

cional, con 17 % durante el proceso de transmisión y distribución de electricidad (Gallegos y Rodríguez, 2015) (Figura 14).

## Nexo agua, energía y alimento

Las energías renovables ofrecen oportunidades substanciales en los nexos agua, energía y alimento. Un rápido desarrollo económico, la expansión de la población y el incremento en la prosperidad demanda energía, agua y alimento, especialmente en países en desarrollo. Se espera que para el 2050 la demanda de energía será el doble a la actual, con un incremento estimado también en la demanda de agua y alimento. Sin embargo, estos bienes son limitados, el reto es mayor considerando un escenario de cambio climático y sus impactos (IRENA, 2015). La disponibilidad y accesibilidad a los recursos hídricos para la extracción de combustibles y la generación de energía representa un elemento clave para la seguridad energética. Asimismo, las interrupciones en el servicio eléctrico, el

cual es esencial en el tratamiento del agua, en la producción y distribución, también posee implicaciones directas en la seguridad hídrica. Las vulnerabilidades en el suministro tanto del agua como de la energía, poseen un riesgo crítico en la seguridad alimentaria, las sequías y las fluctuaciones en los precios de la energía pueden afectar la disponibilidad, capacidad, accesibilidad y utilidad del alimento (IRENA, 2015).

Solo algunas de las tecnologías de energía renovable a lo largo de todo su ciclo de vida son menos dependientes de la disponibilidad de agua, por lo tanto son menos sensibles a esta, en relación a otras tecnologías. Entre ellas se encuentra la tecnología solar, eólica y mareomotriz, las cuales no requieren entradas de agua o emplear algún combustible fósil. La bioenergía, sin embargo, necesita entradas importantes de agua dependiendo de la producción del cultivo que se emplee. La bioenergía basada en residuos requiere de menos agua comparado con los dedicados a culti-

## Capítulo 3

**Figura 15. Capacidad disponible en las grandes centrales hidroeléctricas (MW).**

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Capacidad instalada	9,216	9,216	9,216	9,216	9,216	9,216	9,216	9,216	9,216	9,216	9,216	9,216
Indisponibilidad histórica <sup>1/</sup>	1,046	1,254	1,435	1,146	1,018	1,355	988	690	530	830	1,261	1,102
Indisponibilidad por nivel <sup>2/</sup>	0	9	28	51	151	274	255	179	80	0	0	0
Potencia disponible	<b>8,170</b>	<b>7,954</b>	<b>7,753</b>	<b>8,019</b>	<b>8,048</b>	<b>7,586</b>	<b>7,973</b>	<b>8,347</b>	<b>8,606</b>	<b>8,386</b>	<b>7,955</b>	<b>8,114</b>

1/ Considera: falla, mantenimiento y causas ajenas

2/ Referido al Nivel Recomendado de Operación (NRO), y en el caso de Angostura a sus niveles límite

vos (IRENA, 2015). La cantidad de agua necesaria en las plantas fotovoltaicas (PV) y eólicas, emplean una cantidad despreciable de agua, comparada con las termoeléctricas. Tanto la PV como la eólica emplean 200 veces menos agua que una planta carboeléctrica, para la misma cantidad de energía producida. Las geotérmicas y concentradores solares (CSP) poseen altas necesidades de agua para operar. El consumo en las hidroeléctricas ocurre principalmente por evaporación en los reservorios; por tanto, atribuir el consumo de agua solamente a la generación eléctrica no es correcto (IRENA, 2015). Así pues, el incremento del uso de las energías renovables conduce a la reducción substancial en el consumo de agua (IRENA, 2015).

### Interdependencia del proyecto hidroeléctrico Las Cruces con otras centrales eléctricas del Sistema Eléctrico Mexicano

#### ¿Renovable o solo limpia?

En 1992 se modificó la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica (LSPEE), con el fin de permitir la participación de generadores privados en la producción de energía eléctrica (CENACE, 2015). De acuerdo con la Ley de la Industria Eléctrica (LIE), en el artículo 3, fracción XXII, inciso O, la SENER y Semarnat

determinan con base en parámetros y normas de eficiencia energética e hídrica, emisiones a la atmósfera y generación de residuos, directa o indirectamente durante su ciclo de vida, si se trata de tecnologías limpias o no. Y clasifica a la energía proveniente de centrales hidroeléctricas como tales (Préfontaine, 2010). Sin embargo, la Ley de Transición Energética, Del Objeto de la Ley y Definiciones, artículo 3, fracción XVI, un embalse artificial o natural, solo es considerado como fuente renovable de energía cuando su capacidad de generación sea menor o igual a 30 MW o posea una densidad de potencia, definida como la relación entre la capacidad de generación y la superficie del embalse, superior a 10 Watts/m<sup>2</sup> (SENER, 2016).

#### Contexto del Proyecto Las Cruces

En CFE (2012) queda manifiesto que Las Cruces debería comenzar a operar en el año 2021, aportando una Capacidad Bruta de 490 MW. Analizando la sección A.7 de CFE (2012) la capacidad hidroeléctrica disponible sería de 9,216 MW en 11 centrales y 49 unidades, las cuales en un año de operación se comportaron como en la Figura 15.

Al comparar la indisponibilidad histórica y la capacidad disponible en hidroeléctricas menores, excluyendo el área noroeste, la capacidad disponible es

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Figura 16. Capacidad disponible en las hidroeléctricas menores (MW).**

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Capacidad instalada	1,346	1,346	1,346	1,346	1,346	1,346	1,346	1,346	1,346	1,346	1,346	1,346
Indisponibilidad histórica <sup>1/</sup>	224	288	390	387	398	261	198	207	206	254	305	254
Potencia disponible	1,122	1,058	956	959	948	1,085	1,148	1,139	1,141	1,092	1,041	1,092

1/ Considera: falla, mantenimiento y causas ajenas

de 1,346 MW, en 59 centrales y 151 unidades (CFE, 2012), como en la Figura 16.

El potencial disponible en las hidroeléctricas menores es una cantidad similar a la indisponibilidad histórica de las GCH (CFE, 2012). Las GCH pueden experimentar un incremento de capacidad en sus unidades, por lo que debería ser una opción a explorarse (CFE, 2012). Por ejemplo, Infiernillo, constaba de cuatro unidades de 160 MW y dos de 180 MW. Cuatro nuevas turbinas de 200 MW ha remplazado a las de 160 MW, por lo que 40 + 40 + 40 + 40 MW han sido añadidos, es decir, 160 MW.

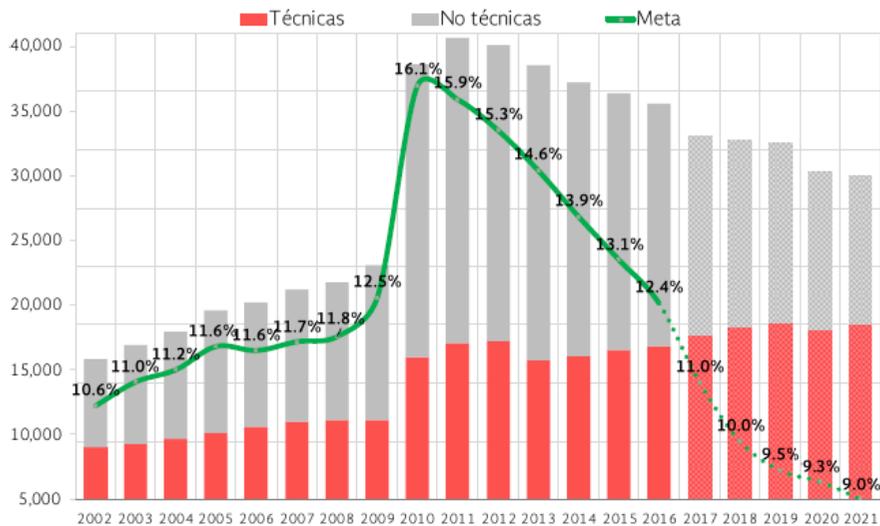
## Vulnerabilidad frente al cambio climático

El cambio climático es la principal amenaza para las hidroeléctricas en México y el resto del mundo, ya que al escasear el agua, los grandes embalses priorizan su uso para el consumo agrícola y humano; i.e., la generación de energía hidroeléctrica se redujo 7,930.4 GWh entre 2014-2015. Para un correcto dimensionamiento, la hidroeléctrica más grande del país, “Chicoasén”, posee una capacidad efectiva de 2,400 MW, durante el 2015 produjo 4,179.4 GWh. Es decir, la cantidad de energía que se redujo debido al cambio climática fue de casi dos veces la producción de Chicoasén (SE-

NER, 2016). En Nayarit, las tres hidroeléctricas que se localizan allí poseen 2,460 MW de capacidad total y una producción de 4,332 GWh al cierre del 2015 (SENER, 2016). Las sequías de largo plazo son acumulativas, por lo que la intensidad de la sequía durante el mes en el que ocurre es dependiente de los patrones de clima que sucedan en ese periodo, además, de los patrones acumulativos de los meses posteriores. Los patrones de clima pueden cambiar de un momento a otro (i.e., durante el día y durante el año). Los impactos hidrológicos de una sequía (i.e., nivel freático, disponibilidad de agua en reservorios, etc.), se producen durante largos periodos y de la misma forma se ocupa de una gran cantidad de tiempo recuperarse de estos. Las centrales hidroeléctricas en el noroeste del país son de uso agrícola y para los escenarios de demanda máxima coincidente del SIN, su capacidad es de aproximadamente el 25 % de la capacidad instalada (CENACE, 2015). Sin embargo, durante el 2015 el comportamiento operativo en la demanda máxima de verano, la disponibilidad de las centrales eólicas en el sureste del país tienen una disponibilidad del 15-20 %, mientras que las del noreste tienen una disponibilidad del 55-65 % (CENACE, 2015). Durante el año 2015 se presentó el fenómeno de El Niño, que provocó la disminución de precipitación por debajo de la media, provocando que la generación hidroeléctrica

## Capítulo 3

**Figura 17. Evolución y meta de pérdidas de energía en distribución 2002-2019 en GWh. La estrategia contempla alcanzar los niveles promedio alrededor del año 2018.**



<sup>1/</sup> No se considera Valle de México en los datos de 2002 a 2009. Pérdidas de energía de CFE Distribución a nivel nacional, considerando como base la energía recibida en niveles de alta tensión. Fuente: Elaborado por la SENER con información de CFE Distribución.

se redujera en 20 %. Durante el primer semestre del 2016, la generación hidroeléctrica disminuyó otro 10 % respecto al 2015 (SENER, 2015).

### Escenarios alternos a la creación del PH Las Cruces

1. Las tarifas residenciales eléctricas subsidiadas en México en promedio son de 1.07 pesos/kWh con una variación de  $\pm 5$  centavos/kWh. A fines del 2012 el monto que representó el subsidio a usuarios con tarifa doméstica fue de 89,821 millones de pesos, monto que pudiera financiar la instalación de 2,763 MW en paneles fotovoltaicos de pequeña escala, monto que representa casi el 5 % de la capacidad instalada a nivel nacional (Gallegos y Rodríguez, 2015). Además, una alternativa favorable y

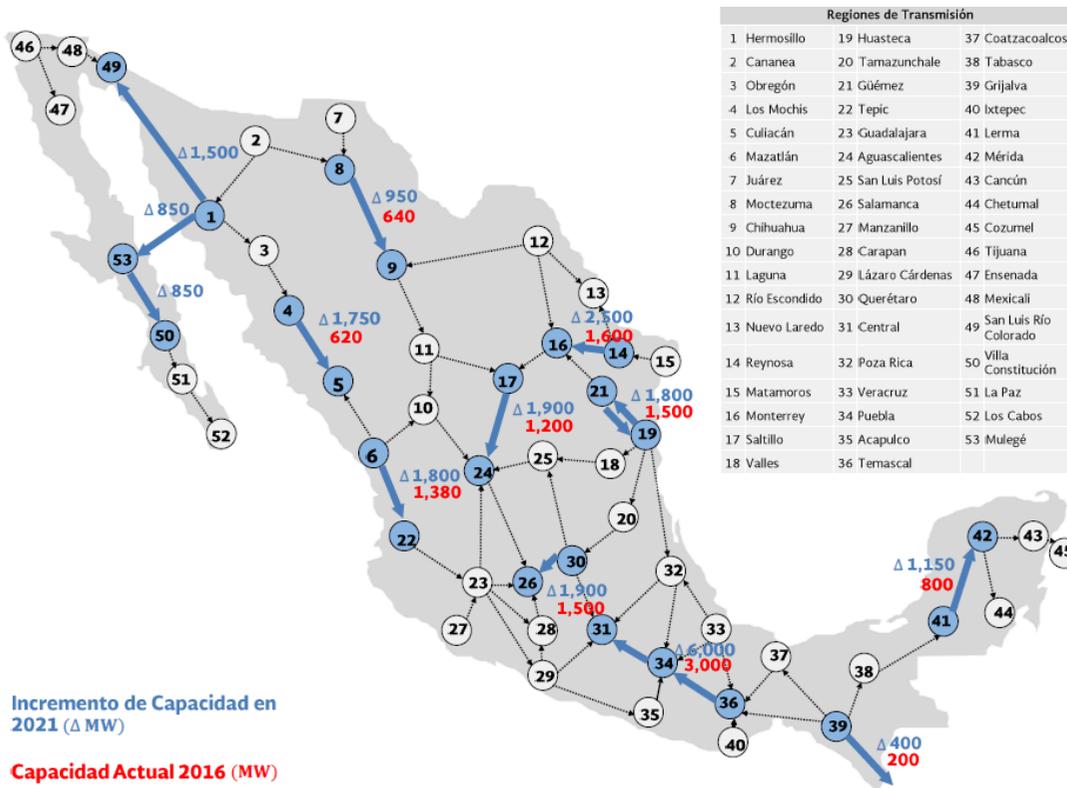
complementaria sería la reducción de las pérdidas por transmisión y distribución (Figura 17).

2. El documento de SENER-IRENA (2015) señala que México puede lograr los 17 GW para el 2030 con las grandes hidroeléctricas con las que ya cuenta. Las soluciones *off-grid*<sup>(3)</sup> y distribuida son las más caras para las comunidades aisladas en México. Las pequeñas hidroeléctricas representan un potencial inexplorado para este segmento (SENER-IRENA, 2015), además son estas las que entran en la clasificación de renovables. La región 22, donde estaría ubicada el PH Las Cruces, recibe energía desde la región 6, lo que facilita el desarrollo de esta opción (Figura 18).

<sup>(3)</sup> *Off-grid* se refieren a aquellas tecnologías independientes a la red eléctrica nacional.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Figura 18. Límites de transmisión 2016-2021. Se puede observar que la región Tepic (22) recibe energía de la región Mazatlán (6), pues posee un incremento de capacidad en 2021, el incremento será de  $1,800 - 1,380 = 420$  MW.**

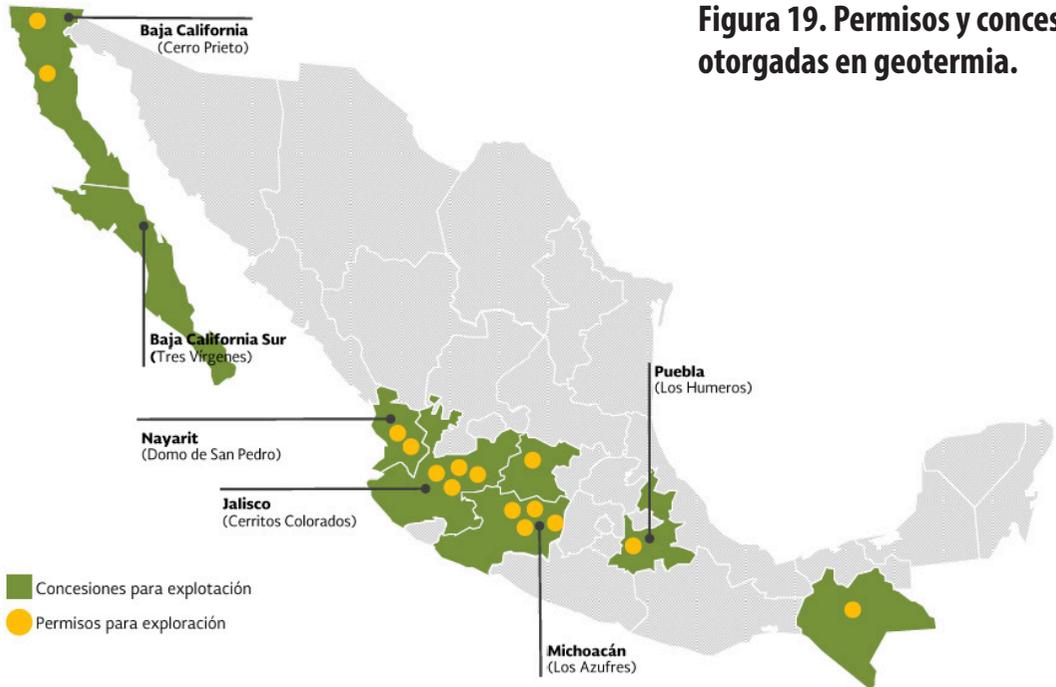


- CFE cuenta con diversas opciones de proyectos hidroeléctricos que van desde aquellos en los que es necesario toda la infraestructura - embalse, equipo turbo-generador y red de transmisión-, mientras que en otros es posible emplear la infraestructura civil existente e incorporar equipo de generación, instalar nuevas unidades y ampliar con ello su capacidad (CFE, 2012).
- Sustitución del PH Las Cruces por otros proyectos renovables, como lo propone el CENACE (2017) mediante geotermia (Figura 19).

## Conclusión

El Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces no es necesario para satisfacer las demandas energéticas del país en la actualidad ni en el futuro, ya que existen varios escenarios alternos a la creación de este. Se invita a observar detalladamente el ANEXO III, donde en el 2015 se proponen dos proyectos hidroeléctricos (281 MW), durante el 2016 se proponen dos proyectos (265 MW) y finalmente durante el 2017 no se propone ningún proyecto. Para el mismo periodo y con la tecnología fotovoltaica, se propone un proyecto de 10 MW para el 2016. En cuanto a geotermia (energía más adecuada para Nayarit) durante el 2015 se proponen tres proyectos (267 MW);

## Capítulo 3



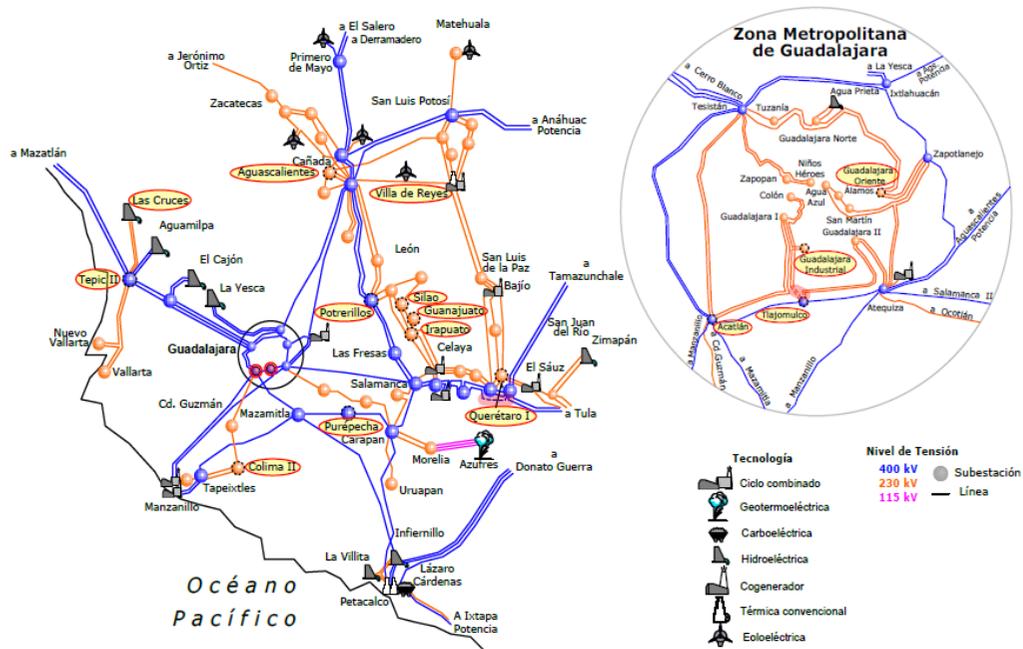
**Figura 19. Permisos y concesiones otorgadas en geotermia.**

Fuente: Elaborado por SENER con datos de CFE y Subsecretaría de Planeación y Transición Energética.

para el 2016, cinco proyectos (261 MW) y para el 2017 se proponen cinco proyectos para instalar 346 MW. La bioenergía se hace presente para el 2017 con un proyecto de 13 MW.

La última publicación donde aparece el PH Las Cruces es en (SENER, 2015) (Figura 20). En SENER (2016) el PH Las Cruces es retirada (Figura 21), lo mismo en la publicación SENER (2017) (Figura 22).

**Figura 20. Principales obras programadas de transmisión región Occidental 2015-2024. En este año sí se considera la central hidroeléctrica Las Cruces.**



Fuente: CENACE.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Figura 21. Principales obras programadas de transmisión región Occidental 2016-2025. En el presente informe no se considera a la central hidroeléctrica Las Cruces.

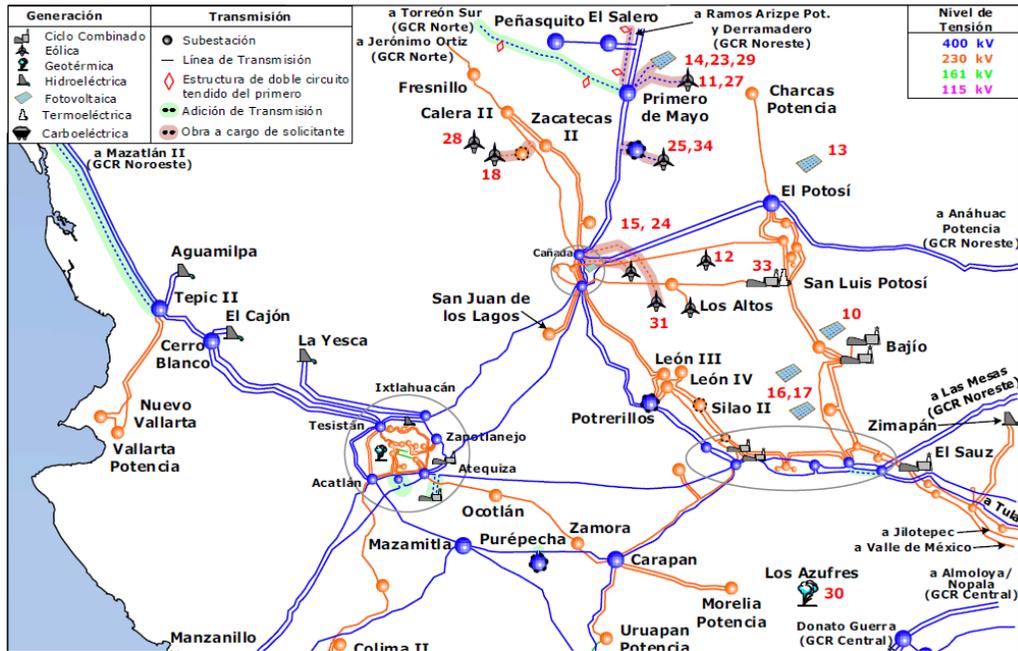
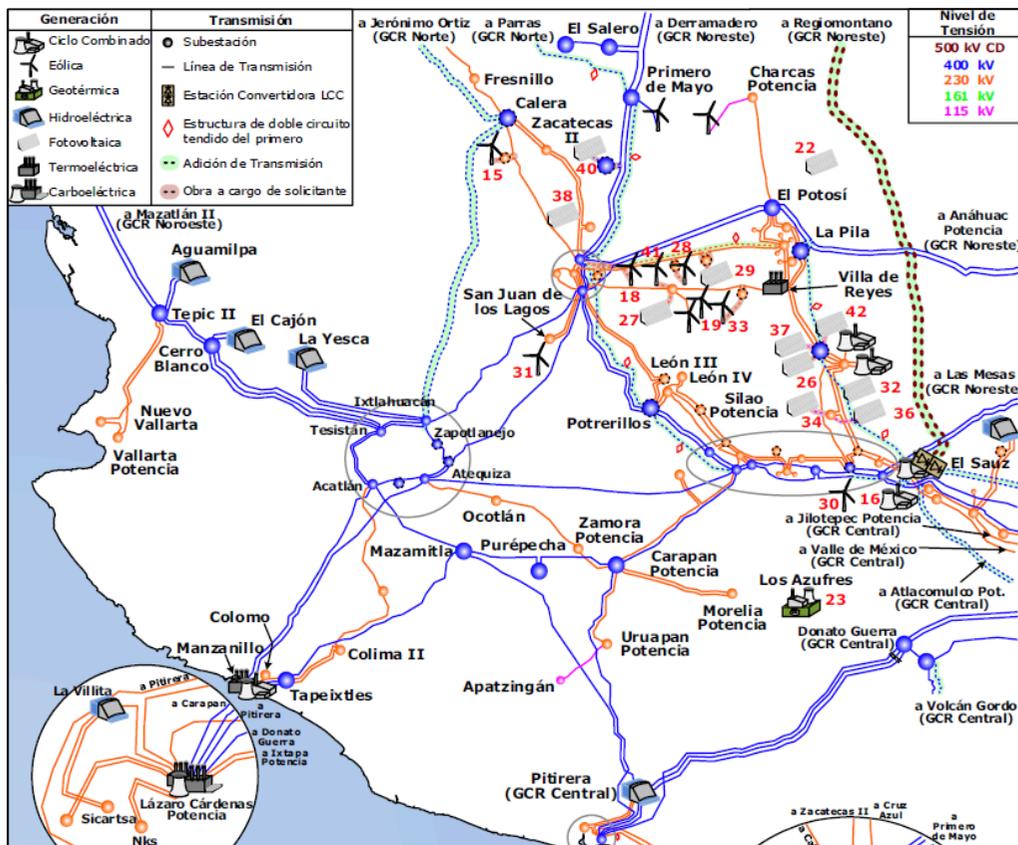


Figura 22. Gerencia de Control Regional Occidental 2017-2026. En la Figura se puede observar que no se considera la Hidroeléctrica Las Cruces, en su lugar se propone una diversificación de la matriz eléctrica con tecnología renovable.



## Capítulo 3

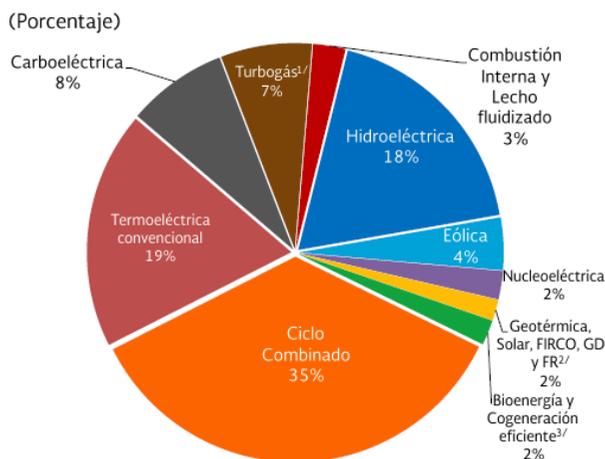
### Referencias

- CENACE, 2015** – Programa de ampliación y modernización de la red nacional de transmisión y redes generales de distribución del mercado eléctrico mayorista-PRODESEN 2015-2029, 101p.
- CFE, 2012** – Programa de obras e inversiones del Sector Eléctrico 2012-2026, Subdirección de programación-Coordinación de Planificación, 370 p.
- Gallegos R. y Rodríguez S., 2015** – Hacia la transformación del mercado eléctrico mexicano: generación distribuida, IMCO-Instituto mexicano para la competitividad A.C., 46 p.
- IEA-ETSAP & IRENA, 2015** – Hydropower-Technology Brief, International Renewable Energy Agency, Energy Technology Systems Analysis Programme and International Energy Agency, 19p.
- IRENA, 2015** – Renewable energy in the water, energy and food nexus, International Renewable Energy Agency, 128 p.
- Préfontaine S., 2010** – Visión general del comercio energético de América del Norte: Metodologías y Características-Memorandum de entendimiento Trilateral sobre la Cooperación en Información Energética, Subgrupo A: Estadísticas de Comercio Energético, 48 p.
- SENER, 2015** – Balance Nacional de Energía 2015, 136 p.
- SENER, 2016** – Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2016-2030 -PRODESEN, 318 p. SENER, 2016, Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030, 132 p.
- SENER, 2016** – Prospectiva del Sector Eléctrico 2016-2030, 128 p.
- SENER, 2017** – Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2017-2031 PRODESEN, 380p. SENER, 2017, Reporte de avance de energías limpias, 21p.
- SENER-IRENA, 2015** – REmap 2030 - A renewable energy roadmap Renewable Energy Prospects: Mexico, 106 p.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

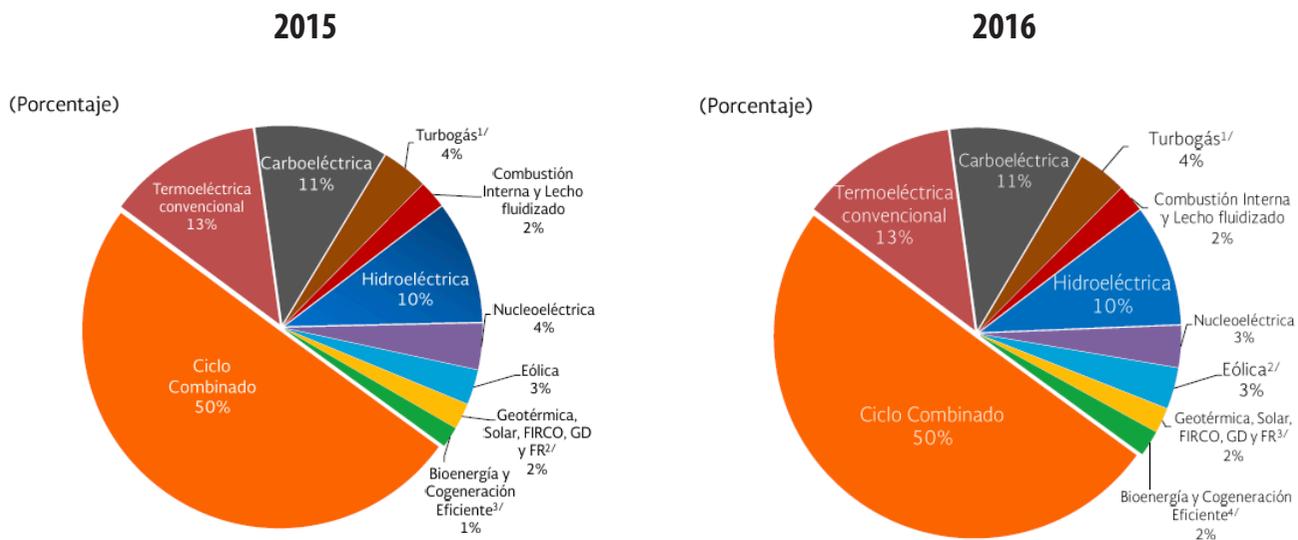
## Anexo I

Figura 23. Capacidad instalada por tipo de tecnología.



<sup>1/</sup> Incluye plantas móviles. <sup>2/</sup> Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), Generación Distribuida (GD) y Frenos Regenerativos (FR). <sup>3/</sup> Once permisos acreditados por la CRE como Cogeneración Eficiente. El total puede no coincidir por redondeo. Información preliminar al cierre de 2015. Fuente: Elaborado por SENER con datos de CFE, CRE y Subsecretaría de Planeación y Transición Energética.

Figura 24. Generación de energía eléctrica por tipo de tecnología.



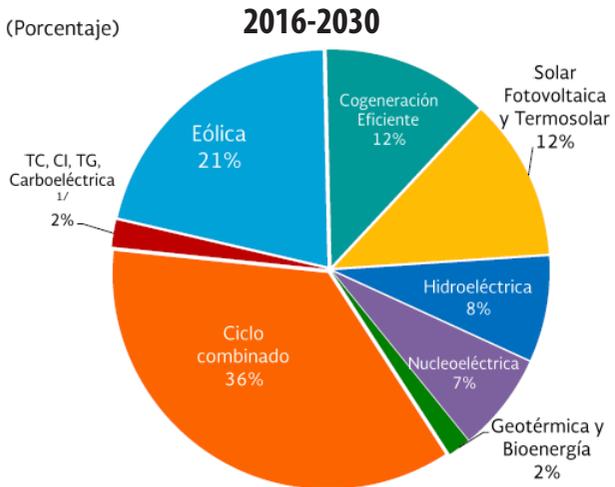
<sup>1/</sup> Incluye plantas móviles. <sup>2/</sup> Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), Generación Distribuida (GD) y Frenos Regenerativos (FR). <sup>3/</sup> Once permisos acreditados por la CRE como cogeneración eficiente. Información preliminar al cierre de 2015. El total puede no coincidir por redondeo. Fuente: Elaborado por SENER con datos de CFE, CRE y Subsecretaría de Planeación y Transición Energética.

<sup>1/</sup>Incluye plantas móviles. <sup>2/</sup>Incluye Generación Distribuida (GD) eólica. <sup>3/</sup>Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), Generación Distribuida (GD) Solar e Híbrida y Frenos Regenerativos (FR). <sup>4/</sup>Incluye Generación Distribuida (GD) de bioenergía. El total puede no coincidir por redondeo. Información preliminar 2016. Fuente: Elaborado por la SENER con datos de la CFE, la CRE, el CENACE y la Subsecretaría de Planeación y Transición Energética.

## Capítulo 3

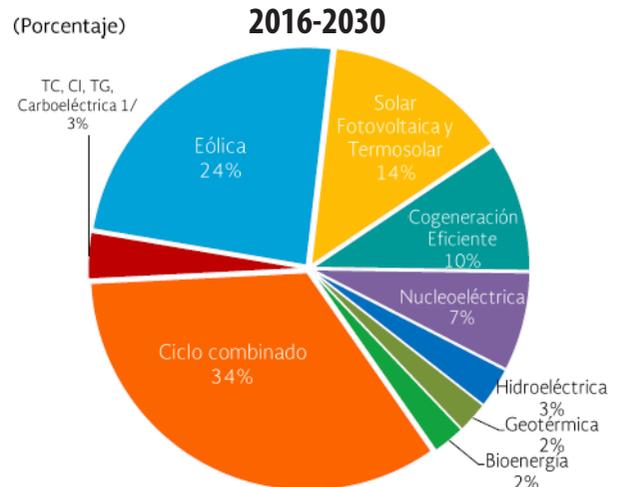
**Figura 25. Participación en a capacidad adicional por tipo de tecnología.**

(Porcentaje)



<sup>1/</sup> Termoeléctrica Convencional, Combustión Interna, Turbogás e Importación. Los totales pueden no coincidir por redondeo. Fuente: Elaborado por SENER.

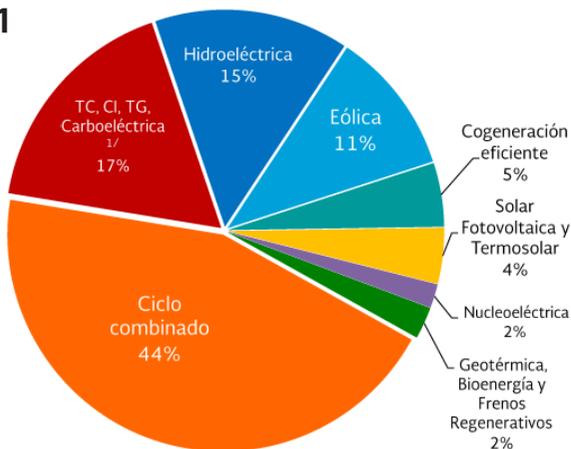
(Porcentaje)



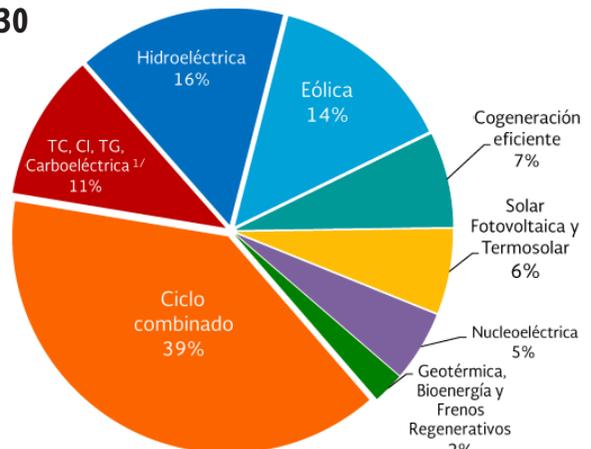
<sup>1/</sup> Termoeléctrica Convencional, Combustión Interna, Turbogás, Carboeléctrica y Lecho fluidizado. Los totales pueden no coincidir por redondeo. Fuente: Elaborado por la SENER.

**Figura 26. Capacidad total disponible por tipo de tecnología en 2021 y 2030.**

**2021**



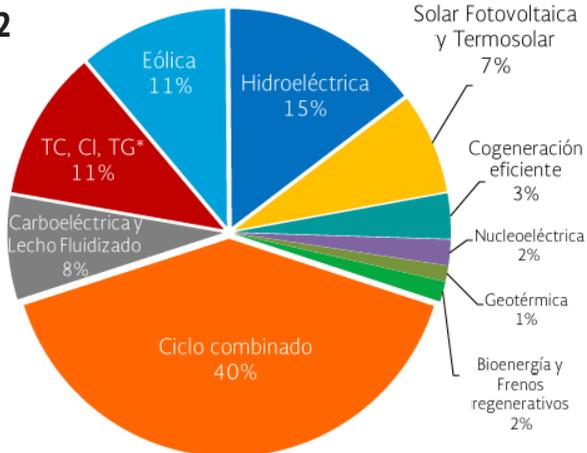
**2030**



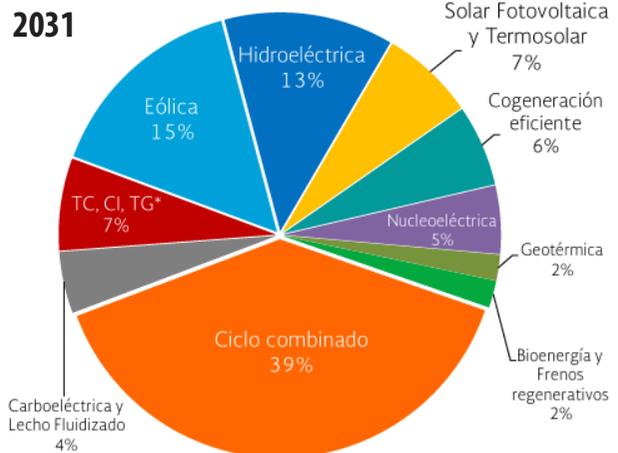
<sup>1/</sup> Termoeléctrica Convencional, Combustión Interna, Turbogás, Lecho fluidizado e Importación. <sup>2/</sup> Los Totales pueden no coincidir por redondeo. Fuente: Elaborado por SENER.

**Figura 27. Capacidad total en operación por tipo de tecnología en 2022 y 2031.**

**2022**



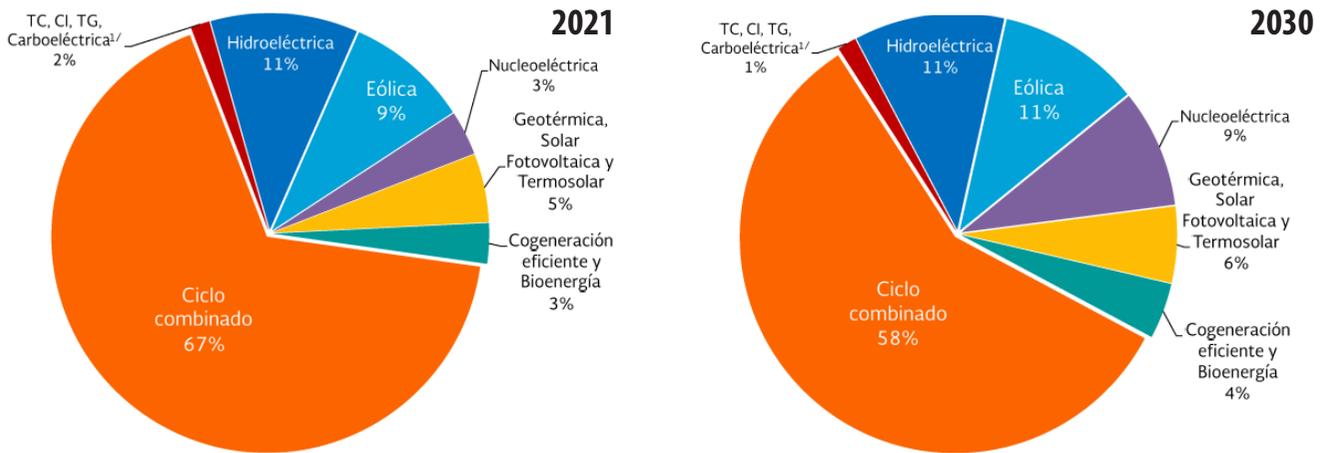
**2031**



<sup>1/</sup> Termoeléctrica Convencional, Combustión Interna, Turbogás, Lecho fluidizado e Importación. <sup>2/</sup> Los Totales pueden no coincidir por redondeo. Fuente: Elaborado por SENER.

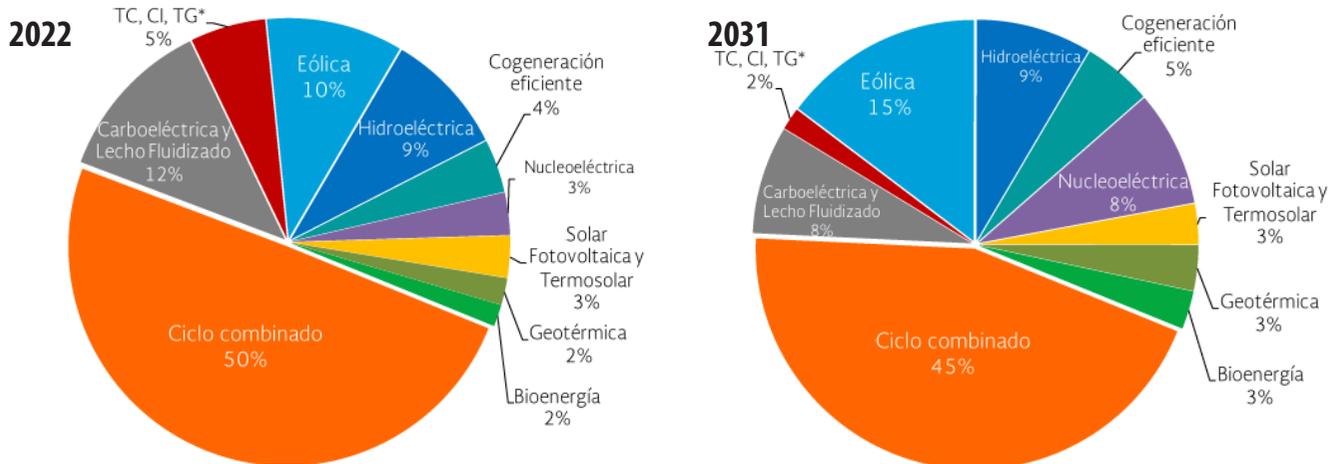
# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Figura 28. Generación total por tipo de tecnología en 2021 y 2030.**



<sup>1/</sup> Termoeléctrica Convencional, Combustión Interna, Turbogás, Lecho fluidizado e Importación. <sup>2/</sup> Los Totales pueden no coincidir por redondeo. Fuente: Elaborado por SENER.

**Figura 29. Generación total por tipo de tecnología.**



\* Termoeléctrica Convencional, Combustión Interna y Turbogás. Los totales pueden no coincidir por redondeo. Fuente: Elaborado por la SENER.

## Capítulo 3

### Anexo II

#### Tabla de permisos de generación e importación de energía eléctrica administrados al 31 de julio de 2017

Con Nayarit como criterio de búsqueda, solo se encontraron los siguientes resultados:			
Permisionario	Número de Permiso	Fecha de entrada en operación	Tecnología
Ingenio El Molino, S. A. de C.V.	E/108/AUT/98	Antes de 92	Turbina de vapor
Generadora Eléctrica San Rafael, S. A. P. I. de C. V	E/121/AUT/98	01/feb/2016	Turbina hidráulica
Teléfonos de México, S. A. B. de C. V.	E/524/AUT/2006	08/jun/2006	Combustión interna
Secretaría de Seguridad Pública, a través del Órgano Administrativo Desconcentrado Prevención y Readaptación Social	E/792/AUT/2008	28/ago/2008	Combustión interna
Bioeléctrica de Occidente, S. A. de C. V.	E/822/COG/2009	31/ene/2017	Turbina de vapor
Mexus Rg, S. de R. L. de C. V.	E/1006/PP/2013	31/dic/2018	Geotérmica
Geotérmica para el Desarrollo, S. A. P. I. de C. V.	E/1025/AUT/2013	01/feb/2015	Geotérmica
Mirgaca 6 Solar, S. A. de C. V.	E/1449/PP/2015	30/sep/2017	Fotovoltaico
Comisión Federal de Electricidad	E/1594/GEN/2015	17/jul/1941	Turbina hidráulica
Comisión Federal de Electricidad	E/1613/GEN/2015	01/mar/2007	Turbina hidráulica

No aparece nada relacionado con el PH Las Cruces.

# Capítulo 4

## Geoindicadores

### Introducción

El esfuerzo y el trabajo desarrollado por el Instituto Nacional de Ecología (INE) y el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), por elaborar un índice de indicadores de sustentabilidad (IDS), con la finalidad de frenar el deterioro ambiental y sentar las bases para revertirlo, tiene una instrumentación de 113 indicadores, de los 134 propuestos por la CDS (INE- INEGI, 2000).

De estos 113 indicadores generados, 39 son de presión, 43 de estado y 31 de respuesta (Figura 1). Las secretarías participantes califican como altamente satisfactorio el resultado obtenido, basando el éxito

en relación al porcentaje calculado como el número de indicadores creados sobre el número de indicadores propuestos por la CDS. Como se verá más adelante, la creación y contextualización de estos indicadores debe mejorarse, ya que para cada caso debe emplearse una escala en particular.

A continuación se presenta el resumen de los indicadores generados por México:

De estos indicadores que se generaron en México, solo se pueden emplear cinco (mismos que representan el 4.42% del total de indicadores), contextualizándolos al estudio de los sistemas fluviales, los cuales se presentan en la Tabla 1.

**Figura 1. Panorama actual de indicadores empleados o existentes en el contexto mexicano (INE-INEGI, 2000).**

#### Balance de los indicadores propuestos por la CDS y los generados por México

Categoría Del Indicador	Tipo de indicador							
	Presión		Estado		Respuesta		Total	
	Propuestos	Generados <sup>1</sup>	Propuestos	Generados <sup>1</sup>	Propuestos	Generados <sup>1</sup>	Propuestos	Generados <sup>1</sup>
Social	13	13	21	16	7	6	41	35
Económico	8	8	12	10	3	1	23	19
Ambiental	22	18	18	14	15	12	55	44
Institucional	0	0	3	3	12	12	15	15
<b>Total</b>	<b>43</b>	<b>39</b>	<b>54</b>	<b>43</b>	<b>37</b>	<b>31</b>	<b>134</b>	<b>113</b>

<sup>1</sup> Incluye los elaborados de acuerdo con la metodología de la CDS y los realizados en carácter alternativo.

## Capítulo 4

**Tabla 1. Indicadores de desarrollo sustentable elaborados en México, y valoración para uso en el aseguramiento de la sustentabilidad de sistemas fluviales. (Elaboración a partir de INE-INEGI, 2000).**

Indicadores para México			
Nombre	Aspecto	PER	¿Aplica para la evaluación de sistemas fluviales?
Concentración de coliformes fecales en agua dulce	Ambiental	E	Sí, siempre y cuando, se ajuste a la escalas necesarias.
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en cuerpos de agua		E	
Cambios en el uso del suelo		P	
Cambios en la condición de las tierras		R	
Tierras afectadas por la desertificación		E	
Uso de pesticidas agrícolas		P	
Uso de fertilizantes		P	

P=presión, E=estado y R=respuesta

### Contexto mexicano

El 72 % de la precipitación pluvial anual en México (1,512 km<sup>3</sup> de agua al año) se evapora para reintegrarse al ciclo hidrológico, 5 % se infiltra y recarga los más de 653 acuíferos del país y el 25 % restante (400 km<sup>3</sup>) escurre a los cuerpos de agua superficiales, entre los que destacan 39 ríos principales, cuyas cuencas ocupan 58 % del territorio; 70 lagos principales; 137 lagunas costeras, y 14,000 cuerpos de agua interiores. Para el aprovechamiento de las aguas superficiales existen alrededor de 4,000 presas en México, cuya capacidad de almacenamiento es de 150 km<sup>3</sup> (Semarnat, 2007).

El grado de presión sobre el recurso hídrico se utiliza como una medida de la vulnerabilidad del país frente a la escasez de agua e identifica si la tasa de extracción es sustentable a largo plazo<sup>(1)</sup>. Cuando el grado de presión es mayor a 40 %, se considera que

existe estrés hídrico severo (Semarnat, 2007). En el nivel regional se distinguen tres zonas totalmente diferentes en el país: el Norte, con niveles de estrés hídrico elevados durante el 2006, con una presión de 87.07 % (Semarnat, 2007), el Centro con niveles medios de 20-40% y el Sur con niveles bajos de 0-20%.

En lo que se refiere a la generación de energía el volumen concesionado hasta diciembre del 2006 fue de 158,566 millones de metros cúbicos, de los que se emplearon 140,295 millones de metros cúbicos para generar 13.2 % de la energía del país (Semarnat, 2007). Actualmente, la capacidad instalada en las centrales hidroeléctricas representa 21.5 17 % de la total instalada en el país (SENER, 2008).

La contaminación de los recursos hídricos es quizá uno de los problemas más graves de deterioro ambiental a los que México se enfrenta, tanto por el

<sup>(1)</sup> La cual se presenta como la relación del volumen total de agua concesionado sobre la disponibilidad natural media del agua.

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

daño a los ecosistemas y hábitats naturales, como por los riesgos a la salud humana y por la inutilización de caudales de agua potencialmente aprovechables.

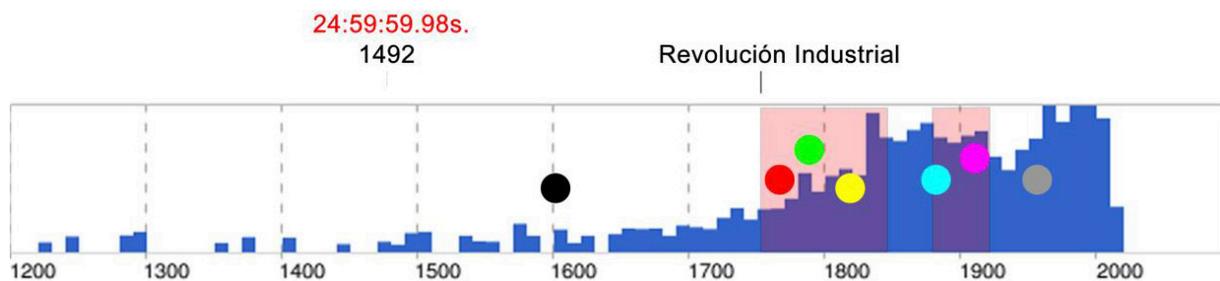
De las 13 regiones hidrológico-administrativas del país, nueve de ellas presentan sitios de monitoreo cuya calidad del agua es clasificada como fuertemente contaminada, ya que presentan valores promedio demanda bioquímica de oxígeno (DBO) superiores a 30 mg/l (Semarnat, 2007).

En nuestro país, alrededor de 20 millones de personas habitan en áreas susceptibles al impacto de huracanes (alrededor de 800,000 km<sup>2</sup> del país). Anualmente se producen daños por 270 millones de

dólares en promedio debido a la erosión de las márgenes de los ríos, las presas pierden 1,100 millones de metros cúbicos de capacidad debido al azolve cada año y se dragan alrededor de 300 millones de metros cúbicos en ríos y puertos (Semarnat, 2007).

Para los próximos años, la definición de fuentes alternativas de suministro de agua, la disminución de los niveles de abatimiento y el mantenimiento del equilibrio de los acuíferos, la generación de acuerdos de distribución y el desarrollo de escenarios que permitan prever el efecto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico en México, serán asuntos que necesariamente deberán enfrentarse de manera integral bajo el principio de la sustentabilidad.

**Figura 2. La evolución de la geología como ciencia, no es un hecho aislado de la evolución técnica de la humanidad en general y mucho menos de la concepción del hombre y su entorno. Sin embargo las bases de la geología nacen cuando el hombre apenas impactaba a su medio, razón por la cual la concepción del hombre como agente de cambio ha evolucionado hasta el día de hoy.**



■ Periodos 1 y 2 de la revolución industrial. (1750-1840) y (1180)-1914) respectivamente. ■ Eventos relacionados con el avance de la geología.

### Listado de eventos importantes para entender este trabajo:

- |  |   |   |   |                                      |  |  |
|--|---|---|---|--------------------------------------|--|--|
| ●  | ●   | ●   | ●   | ●                                    | ●  | ●  |
| <b>1600</b>  | <b>1775</b>   | <b>1785</b>   | <b>1830</b>                                   | <b>1896</b>                          | <b>1913</b>  | <b>1950</b>  |
| Obispo Ussher intentó calcular la edad de la tierra, con origen en el 4004 ac. | La geología se enseña por primera vez como ciencia en Friburgo, Alemania. | James Hutton publica Teoría de la Tierra - bases del uniformismo. | Charles Lyell publica Principios de Geología. | Descubrimiento de la radioactividad. | Publicación de la primer escala de tiempo geológico - Edad de la Tierra (A. Holmes). | Aplicación geológica de la radiación en datación radiométrica. |

Fuente: elaboración a partir de [www.minerals.nsw.gov.au](http://www.minerals.nsw.gov.au)

### Fundamento teórico

#### Antecedentes sobre la sustentabilidad, indicadores y geoindicadores

Charles Lyell, en su obra *Los fundamentos de la geología* (1830) se refería a la influencia del hombre sobre la Tierra y señalaba que la tala de árboles y el drenaje de los lagos y pantanos tendía a variar en gran manera el estado de la superficie habitable, sin embargo él creía que las fuerzas generadas por el hombre eran despreciables comparadas con la fuerza ejercida por la naturaleza. No es de extrañar que Lyell pensara de esta manera pues podemos justificar su pensamiento basados en el contexto tecnológico del tiempo en el cual vivió (Figura 2), período que comprende el inicio de la revolución industrial.

A finales de la década de 1980 y principios de la década de 1990, comienza una nueva modalidad de desarrollo, con una perspectiva ambiental y conciencia sobre los límites permitidos (resiliencia<sup>(2)</sup>), actuando a favor de las futuras generaciones y la justicia social; en otras palabras, un desarrollo sustentable.

Para alcanzar este estado es necesario incorporar a nuestros análisis indicadores ambientales, los cuales son medidas que hacen perceptible una tendencia o fenómeno que no es inmediatamente detectable. La IUGS (*International Union of Geological Sciences*) decidió, en 1992, a través de su Comisión de Ciencias Geológicas para el Planteamiento Ambiental (*COGEOENVIRONMENT*), establecer indicadores geológicos para utilizar en los informes ambientales y en el manejo de ecosistemas. Los geoindicadores

son medidas, magnitudes, frecuencias, ritmos y tendencias de procesos y fenómenos geológicos que ocurren en la superficie terrestre y están sujetos a cambios ambientales significativos en períodos menores a 100 años (Berger, 1996).

El concepto de desarrollo sustentable se conoció por medio de una publicación de la *World Conservation Strategy* (Estrategia Mundial de Conservación), realizada en 1980 por la *International Union for the Conservation of Nature* (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza). Sin embargo el concepto de sustentabilidad se hizo popular hasta 1987, cuando la Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo de las Naciones Unidas realizó un informe denominado Informe Brundtland, que transformó al desarrollo sustentable en un instrumento conceptual para tratar los tópicos relacionados con la protección al medio ambiente.

La palabra indicador proviene del latín *indicare* cuyo significado es indicar, mostrar algo con indicios y señales (*Ministry of Environmental and Energy*, 1995). Por tanto, el uso de un indicador implica el uso de un objeto que refleja algo distinto al mismo, normalmente más complejo. Otra definición, sería ver a un indicador como la “medida de la parte observable de un fenómeno que permite valorar otra porción no observable de dicho fenómeno” (Chevalier *et al.*, 1992).

Por otra parte, el Instituto Francés de Medio Ambiente define a un indicador como un “dato que ha sido seleccionado a partir de un conjunto estadístico más

<sup>(2)</sup> Del latín *resilio*, *resilire*: saltar hacia atrás, rebotar. Su significado depende del contexto, la resiliencia en los sistemas naturales, se refiere a la capacidad del sistema de absorber y/o adaptarse (soportar) perturbaciones (presión).

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

amplio por poseer una significación y una representatividad particulares” (Sánchez, 2002). Sea cual sea su función y escala, los indicadores deben cumplir con tres funciones básicas (Adriaanse, 1993):

- ▼ Simplificación
- ▼ Cuantificación
- ▼ Comunicación

Esta clase de indicadores son considerados por muchos como una herramienta metodológica nueva, que proporciona valores cualitativos y cuantitativos para ayudar en la toma de decisiones sobre las intervenciones en el medio ambiente con base en información objetiva, reduciendo la incertidumbre en la gestión del sistema ambiental que se trate (Bell *et al.*, 1999).

Los indicadores se organizan en índices, lo cuales a su vez se pueden agrupar de diversas formas, según su aplicación: por temas, sectores, escala espacial (global, regional, local), medio de aplicación (agua, aire, suelo, recursos bióticos o abióticos), etc., siendo el objetivo la selección de indicadores que describan la totalidad de los efectos en el sistema. La representatividad de los indicadores, está condicionada a la calidad de la información en la cual están basados.

En la actualidad no existe ningún procedimiento estándar y formal para la elaboración de indicadores, pues se han utilizado criterios en función de

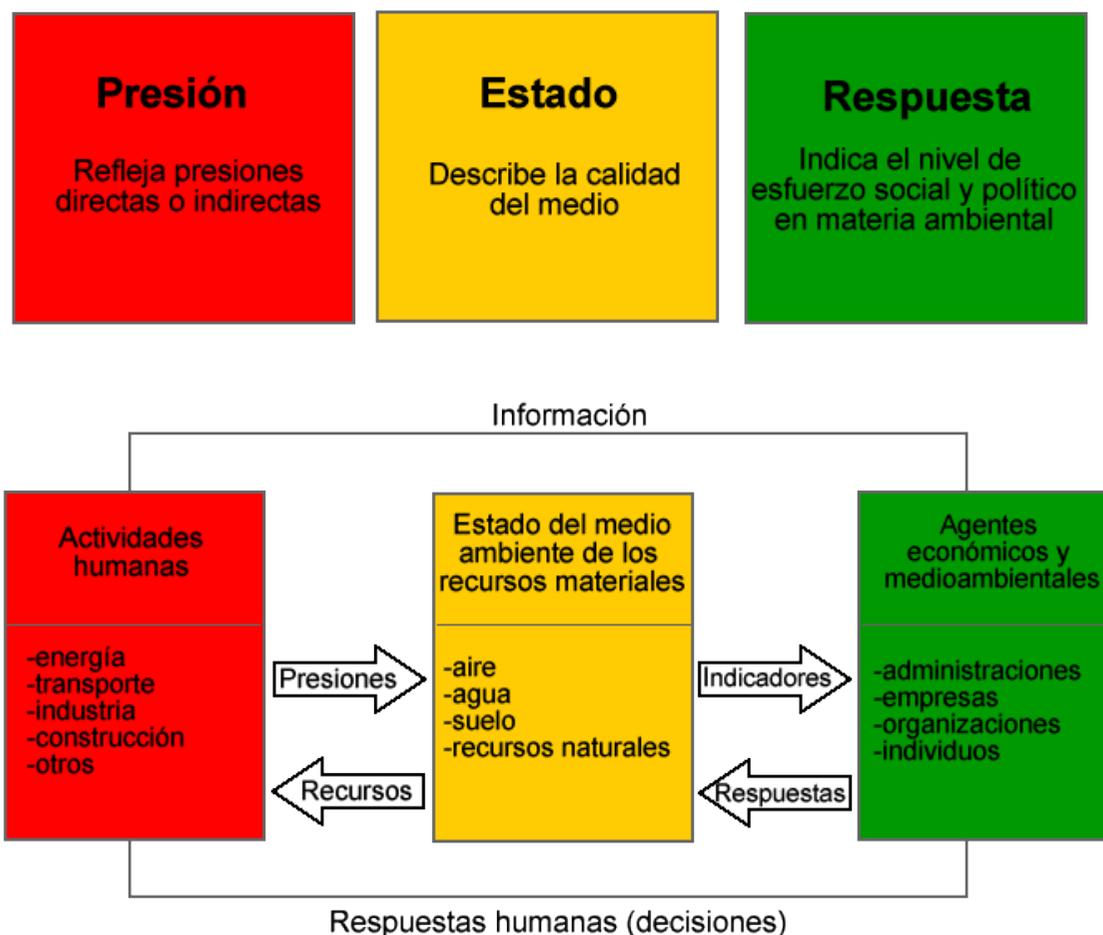
las particularidades y necesidades de cada sistema. Sin embargo, existe un modelo clásico y ampliamente adaptado propuesto por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico<sup>(3)</sup> (OCDE), denominado indicadores de Presión-Estado-Respuesta (Figura 3), en el cual las actividades humanas presionan sobre el medio ambiente (contaminación y uso de recursos), modificando el estado de ese ambiente (biodiversidad, integridad ecológica y terreno), etc., lo cual tiene un respuesta humana mediante políticas y acciones que intentan controlar dicha presión (López, 2008).

Este índice debe ser por definición una herramienta metodológica de la sustentabilidad, debe ser capaz de ubicarse en un contexto dinámico, ya que ningún sistema natural permanece estático o constante en el tiempo. Además debe adaptarse a los campos de variación del conocimiento, así como a la percepción y respuestas de los tomadores de decisiones a la hora al enfrentar problemas ambientales, contextualizándolos dentro de las tres grandes esferas que componen al concepto teórico de la sustentabilidad: las esferas ambiental, económica y social.

La carencia de información estadística de modelos conceptuales consistentes y de medios técnicos recortan el alcance de medición de los indicadores, tanto ambientales como de sustentabilidad, los cuales presentan un dominio desde la perspectiva económica-social en los mismos indicadores ambientales, lo que hace que estos no resulten adecuados para reflejar la evolución del medio físico y se pasa

## Capítulo 4

Figura 3. Modelo PER para indicadores (adaptado de OCDE, 1993).



de una posición determinante de la esfera ambiental a otra subordinada y además subjetiva (Bermejo, 2002; Ramírez, 2002).

Los modelos matemáticos de los ecosistemas ignoran casi siempre el espacio, lo cual no es reflejo de una realidad ya que todo ecosistema ocupa un lugar en el espacio y posee capacidad de interacción entre sus elementos y sus alrededores, en función de sus posiciones relativas (Margalef, 1982). La observación hecha por Margalef mantiene una vigencia actual, lo cual ha acarreado que tanto los indicadores ambientales como de sustentabilidad sean tratados con frecuencia de forma anespacial.

Sin embargo, en los últimos años los avances en los sistemas de información geográfica y teledetección han servido para corregir este problema, con lo cual la mejora de los indicadores de sustentabilidad ha sido notable, sobre todo en aquellos indicadores ambientales.

El modelo PER presenta la limitación de no considerar la existencia de causalidades bidireccionales, ni de respuestas involuntarias de los sistemas naturales, sociales y económicos (Spangenberg, 1998). Es pues, un sistema antropocéntrico que tiende a subvalorar los mecanismos de autorregulación de los sistemas que componen el entorno natural.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

## Diseño de indicadores

### Principios básicos

Todo indicador debe contextualizarse en un sistema espacial escalable y medible. Los valores que toman los indicadores han de estudiarse en relación con la forma en que estos varían en el espacio y tiempo. La escala temporal elegida ha de adecuarse a nuestros propósitos y capacidad de medición. La sensibilidad del indicador debe ser tal que no pasen inadvertidas las perturbaciones que genere el hombre a los sistemas ecológicos.

El sistema de indicadores debe asegurar la comparación entre los indicadores que lo conforman. Para ello, se debe cuidar la escalabilidad matemática, de manera tal que las variables guarden entre sí relaciones que permitan la interpretación cuantitativa y cualitativa de los resultados a través de operaciones matemáticas (Hardi y Zdan, 1997).

### El clima y su efecto en el terreno

La escorrentía es un proceso dependiente de la precipitación total anual. El incremento de la escorrentía influye en la erosión del canal hasta que los canales del río se restablecen a nuevas condiciones de equilibrio. En este sentido, los canales del río ajustan continuamente su morfología en respuesta a ambos: el régimen hidrológico y de la carga de sedimentos impuesta por las condiciones del drenaje de la cuenca (Bogen, 2006; Peizhen *et al.*, 2001). Se ha documentado un incremento en la tasa de sedimentación en los sistemas fluviales a nivel mundial en los últimos 2 millones de años. Esta observación

se ha dado en una variedad de ambientes fluviales, tanto en sistemas orogénicos activos como inactivos, y se ha atribuido principalmente a variaciones en las condiciones climáticas, resultando en la respuesta morfométrica de los sistemas fluviales a los cambios frecuentes y abruptos de temperatura, precipitación y vegetación (Peizhen *et al.*, 2001).

Cambios del 25 % en la precipitación, conlleva a un cambio de un 50 % en la escorrentía, lo cual muestra la sensibilidad del caudal a los cambios de precipitación. Si cambiamos una unidad en la precipitación o en un 10 %, el efecto en la escorrentía se hará manifiesto en 10 unidades de cambio o en un 45 % su configuración. A esto podemos agregar que la precipitación en zonas áridas muestra mayor variabilidad comparado con la de los climas húmedos (Leopold, 1959; Gordon y Famiglietti, 2004).

Las variables morfológicas independientes ajustan su respuesta en función de la interacción con variables que controlan aspectos independientes tanto hidrológicos como sedimentológicos de la cuenca. Las principales variables independientes son la energía de la corriente, el tamaño del sedimento junto con las características de su distribución y la forma de las partículas clasificadas por su tamaño como gravas, ya que estas variables reflejan la energía de la corriente y las propiedades del sedimento. Las variables independientes son las que configuran el transporte de sedimentos, por tanto son las que dan forma a los canales del sistema fluvial. Por otra parte, las variables morfológicas dependientes son las referidas tanto a la geometría del canal como en la de toda la cuenca.

Los patrones de drenaje son resultado de los procesos relacionados a la estructura y litología que se encuentran como basamento en el área de estudio, mismos que pueden ser tomados como patrones geométricos para su estudio, en conjunto con las propiedades litológicas y climáticas con respecto al espacio y tiempo.

### Textura y patrones de drenaje

El patrón de drenaje de una cuenca es el arreglo general de los canales de sus tributarios, los cuales reflejan la influencia de factores como la pendiente inicial, litología, controles estructurales, así como los antecedentes geomorfológicos y geológicos recientes de la cuenca.

La clasificación de los patrones de drenaje más habituales se muestra en la Figura 4.

### Orden de corriente

El análisis morfológico de los sistemas fluviales facilita la comparación entre distintos sistemas fluviales o cuencas hidrológicas, con la finalidad de obtener relaciones entre los distintos aspectos que describen los patrones de drenaje y para definir ciertas propiedades significativas útiles para entender el funcionamiento de las mismas en relación a su entorno.

Los estudios morfométricos en las cuencas hidrográficas realizadas por Horton (1945), Strahler (1952), Rzhantsyn (1960) y otros, demuestran que los parámetros relevantes en la configuración morfométrica de las cuencas, se componen por rasgos como los patrones de drenaje, pendientes y relieve, mismos que constituyen los parámetros de estado estacionario en

### Figura 4. Distintos tipos de drenaje.



**a) Patrón dendrítico.**- Patrón de drenaje más común, caracterizado por bifurcaciones irregulares de sus tributarios en diversas direcciones formando entre ellas, generalmente ángulos menores a  $90^\circ$ . Estos patrones se desarrollan sobre rocas de resistencia uniforme, los cuales indican una carencia de control estructural, localizado en casi todos los horizontes de rocas sedimentarias o en áreas con cantidades mayoritarias de rocas ígneas.



**b) Patrón enrejado.**- Sistema de corrientes subparalelas, usualmente sobre las fallas de la formación de rocas o entre rasgos topográficos paralelos recientemente depositados por el viento, agua o hielo.



**c) Patrón radial.**- Este tipo de patrón es encontrado en los flancos de los domos o volcanes y otros varios tipos de colinas de forma cónica o subcónica.



**d) Patrón paralelo.**- Se localiza en regiones con pendientes pronunciadas o con fuertes controles estructurales que marcan un espaciado regular y paralelo entre los canales.



**e) Patrón rectangular.**- Las corrientes tributarias forman en relación a las corrientes de mayor orden patrones de conexión en ángulos rectos, los cuales se encuentran de manera común en áreas donde se interceptan estructuras en ángulos perpendiculares.



**f) Patrón de déficit.**- Estos indican una completa carencia de control estructural o litológico; este patrón ocurre generalmente asociado a cuencas<sup>(4)</sup> irregulares que aportan o parten de lagos y pantanos, los cuales son pocos y de muy poca longitud.



**g) Patrón centripeto.**- En este patrón las corrientes convergen en una depresión central.



**h) Patrón altamente violento.**- Este patrón es característico de áreas con una geología compleja; es decir, son el resultado de las diferencias litológicas, pendientes regionales, la presencia de fallas y estructuras, y una marcada actividad geológica. (Modificado de Garde, 2006).

<sup>(4)</sup> El término de cuenta se refiere a las corrientes de primer orden o grado, es decir aquellas a las cuales no se les une ninguna corriente.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

el sistema fluvial; los cuales controlan la cantidad de sedimentos y del flujo en tránsito de los mismos.

## Forma de cuenca

La forma que poseen los canales depende de la interacción entre el flujo y los materiales erosionables en el límite del canal. Dichas interacciones varían considerablemente para distintas escalas tanto temporales como espaciales. La forma de la cuenca afecta a las características hidrológicas de la misma.

## Litología

Tanto la litología como la estructura de las rocas que componen las cuencas, poseen un papel de primera importancia, ya que determinan las características de erosión, entre otras. Además, la naturaleza y tipos de vegetación son parcialmente controlados por el tipo de roca. Por tanto, la razón de la carga de sedimentos y la descarga de agua dependen del tipo de roca.

## Densidad de drenaje y frecuencia de corrientes

Se sugiere el empleo de una escala que defina la densidad de drenaje, ya que es poco práctico y ambiguo el uso de términos relativos para expresar la densidad de drenaje, como lo serían los términos bajo, medio y alto.

Las cuencas son entidades bien diferenciadas topográfica e hidrológicamente, las cuales poseen una densidad de drenaje acorde o como reflejo de los controles geomorfológicos, litológicos, climáticos, vegetativos y antropogénicos. La densidad de drenaje consiste en la medida acumulativa de la longitud de todas las pequeñas corrientes (tributarias)

aunadas a las corrientes mayores mostradas en el drenaje de la cuenca.

La densidad de drenaje no varía generalmente con el orden de corriente entre distintas cuencas. Sin embargo, Morisawa (1968) señala que la densidad de drenaje de toda la cuenca tiende a aproximarse a la media de la densidad del drenaje de primer orden, ya que son las cuencas las que aportan la mayor parte de la longitud total del drenaje del sistema fluvial en la matemática para calcular la densidad.

## Aspectos del relieve

El relieve puede ser expresado como una tasa de relieve  $R_h$ , que expresa la razón del máximo y mínimo relieve contra la distancia máxima a horizontal, la cual suele ser una línea paralela a la corriente principal (Schumm, 1956). Melton (1958) define el relieve relativo como el máximo valor del relieve o altura máxima  $A_m$  dividido por el perímetro de la cuenca  $P_c$ . Otra serie de parámetros adimensionales fueron introducidos por Strahler (1957), como lo son:

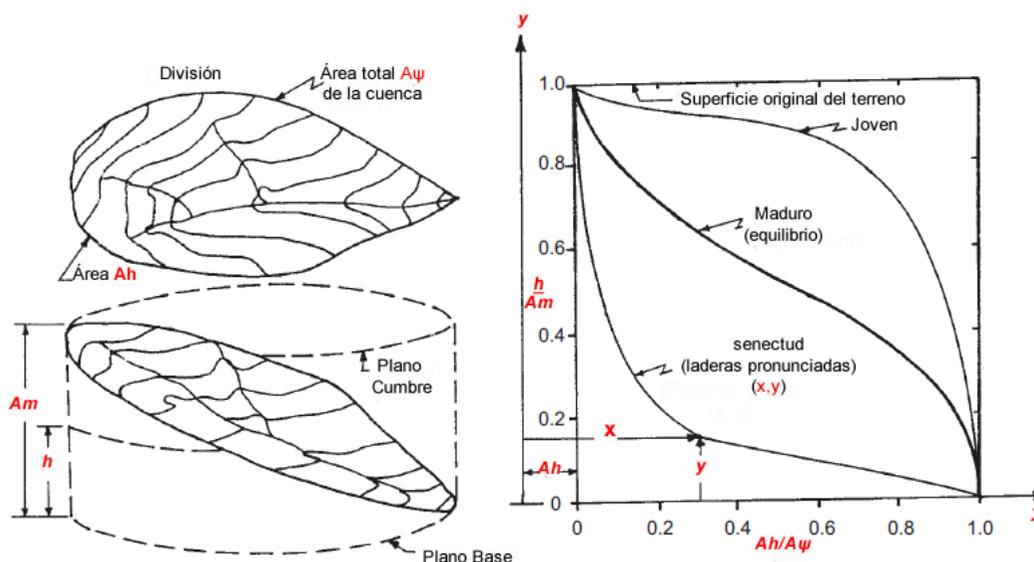
- ▼ El número de rugosidad que representa el producto del valor máximo de  $A_m$  y la densidad de drenaje  $D_d$ .
- ▼ El número de geometría definido como  $(A_m D_d / S)$  donde  $S$  es el valor de la pendiente de la base de la cuenca.

## Curvas hipsométricas

Anderson y Anderson 2010, definen las curvas hipsométricas como la distribución estadística de la

## Capítulo 4

**Figura 5. Representación gráfica de la curva hipsométrica;  $z$  se refiere al exponente que representa el grado de madurez de la topografía, el cual crece de forma directamente proporcional a la "edad". (Modificado de Garde, 2006).**



topografía representada en forma de integral. Esta se refiere a la superficie de área como una función de la elevación, dicho de otra forma, la integral del área con respecto a la elevación, comenzando con la elevación más baja registrada (Figura 5).

En la Figura 5 se puede observar las distintas etapas topográficas en el desarrollo de un sistema fluvial. Las curvas hipsométricas se encuentran estrechamente relacionadas con las características hidrológicas del sistema fluvial de la cuenca. Lo cual explica que la distribución de la elevación en el drenaje de la cuenca se relaciona con la cantidad de flujo disponible (almacenado), que a su vez controla la suavidad de las curvas hidrográficas, el tiempo de respuesta y los picos de caudal máximo o incluso extraordinario.

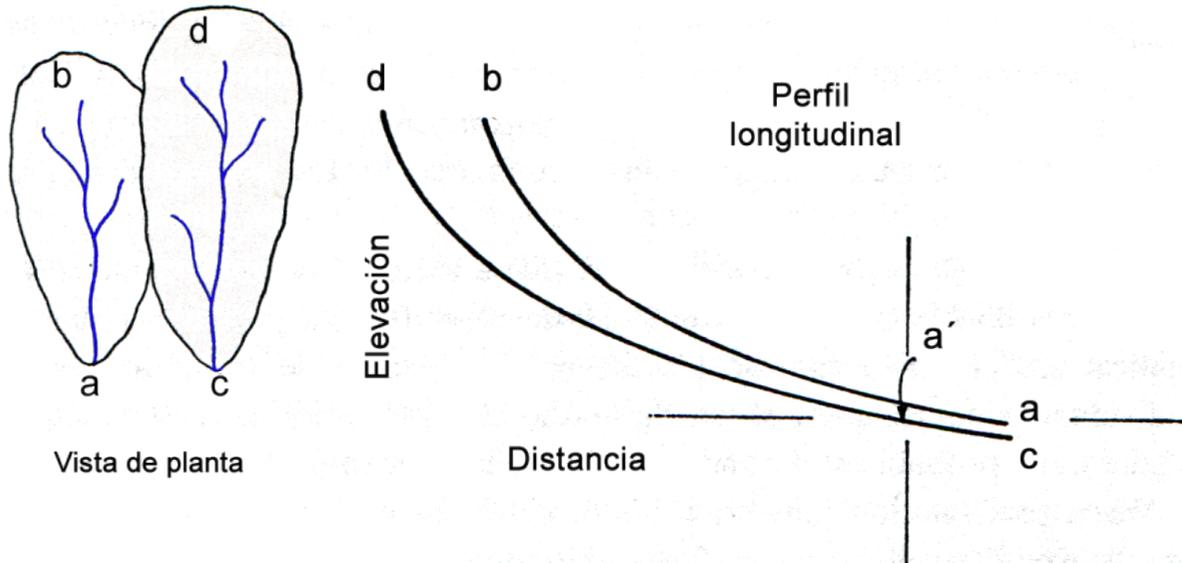
### **Evolución de los patrones de drenaje**

La pendiente del canal decrece de manera exponen-

cial en relación con el orden de corriente, es decir, los canales de mayor orden poseen gradientes más planos. En cuencas similares a la misma distancia entre sus divisorias y el canal principal, el gradiente de canal de las corrientes será igual, incluso con la variabilidad esperada a través de la configuración natural del drenaje (Hack, 1957). Por tanto, si en una área de litología uniforme dos canales de corriente adyacentes son creados a la misma elevación y estos poseen distinta longitud, el más largo de ellos tenderá hacia elevaciones más bajas, aún en el mismo corte transversal. La Figura 6 ilustra el fenómeno anteriormente descrito.

Las corrientes ab y cd son comparables excepto en longitud y por tanto en el área de drenaje. Los perfiles longitudinales son exactamente iguales ( $da' = ba$ ) si son originados a la misma elevación. Pero debido a que cd es más largo que ab, c tiende a

**Figura 6. Demostración gráfica del comportamiento de la elevación-distancia en la creación o evolución del perfil longitudinal de los cauces del río o esorrentía. (Modificado de Luna, 1964).**



una elevación menor que a. Si por alguna razón la división entre ambas corrientes fuese retirada (erosionada), el agua fluiría desde el canal de captación más pequeño hacia el más grande y la corriente más larga terminará capturando el área de drenaje de la corriente más pequeña.

Todo lo descrito anteriormente nos lleva a pensar que la red de drenaje puede ser construida o desarrollada aplicando dos principios:

1. Cuando el potencial de erosión excede la resistencia a la erosión, un nuevo canal será formado o si este ya existe, será extendido.
2. Asumiendo que la erosión es una función del ángulo y la longitud de pendiente, el argumento general acerca de la contribución por cuencas descansa en el desarrollo de una red de drenaje en la cual, por lo menos cualitativamente, la porción geométrica respeta las

propiedades geométricas del drenaje natural de la cuenca (Horton, 1945).

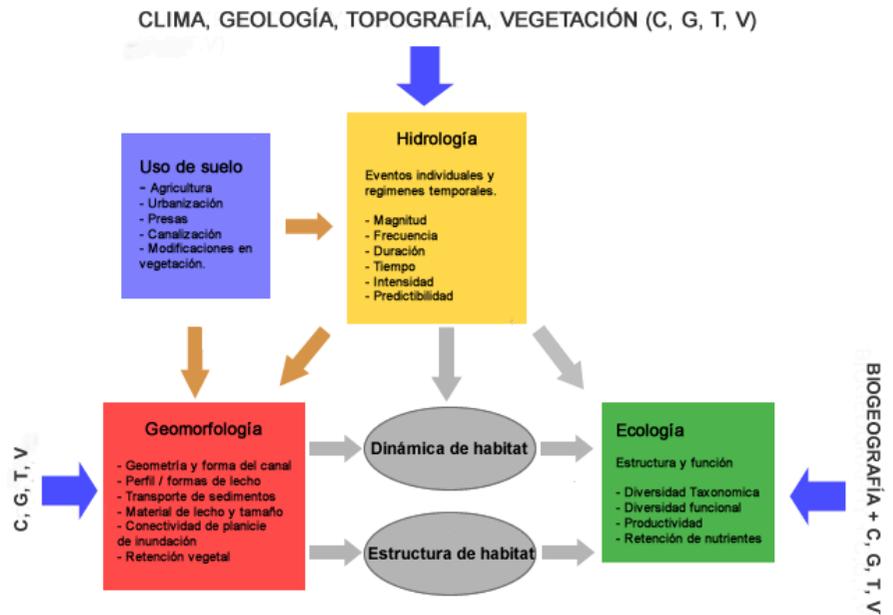
Por tanto, al ir cambiando la escala, también cambiará el número de canales y su longitud de forma proporcional. La longitud de una cuenca se incrementa de alguna forma más rápidamente que su anchura promedio, de ahí que las cuencas posean esa forma tan peculiar alargada conforme a su evolución.

### Presión antrópica

En la actualidad el impacto producido por los seres humanos y sus actividades modifica el medio natural. Por ejemplo la agricultura ha modificado los ecosistemas terrestres con la introducción de especies y cambios en usos de suelo (Vitousek *et al.*, 1997). Como consecuencia, los procesos geomorfológicos también se han visto acelerados debido a la erosión del suelo y las diversas actividades que impactan los sistemas fluviales (Collier *et al.*, 1996; Graf, 1999; Magilligan *et al.*, 2003; Magilligan y Nislow, 2005).

## Capítulo 4

**Figura 7. Ilustración conceptual de las relaciones existentes entre la hidrología, geomorfología, ecología y las corrientes de los ríos en los sistemas fluviales, y cómo las presiones humanas, como el uso de suelo, modifica los procesos hidrológicos y geomorfológicos, los cuales inducen a distintas respuestas ecológicas. (Digitalización de Poff *et al.*, 2006).**



La construcción de presas altera dramáticamente los procesos fundamentales en la regulación de magnitudes, tasas de agua, sedimento y aporte de nutrientes en las cuencas (Vitousek *et al.*, 1997; Jackson *et al.*, 2001). También se ven alterados los patrones hidrogeomorfológicos de los sistemas fluviales, a escalas tanto regionales como continentales (Figura 7).

Las presas representan una fuente puntual de alteración del flujo y transferencia de materiales (sedimentos) (Poff y Hart, 2002). Estas estructuras provocan una larga lista de efectos en la configuración de flujos, regímenes de sedimentación, condiciones que pueden ser escaladas en proporción con el tamaño de la presa y/o embalse (lo cual determina el tiempo de retención hidráulica) relativo a la corriente (Poff y Hart, 2002).

Sin embargo, apenas en los últimos años se le ha dado importancia a las configuraciones del flujo, lo cual ha sido reconocido como un tema principal

para la administración de las presas (Stanford *et al.*, 1996; Poff *et al.*, 2003; Bunn y Arthington, 2002; Richter *et al.*, 2003).

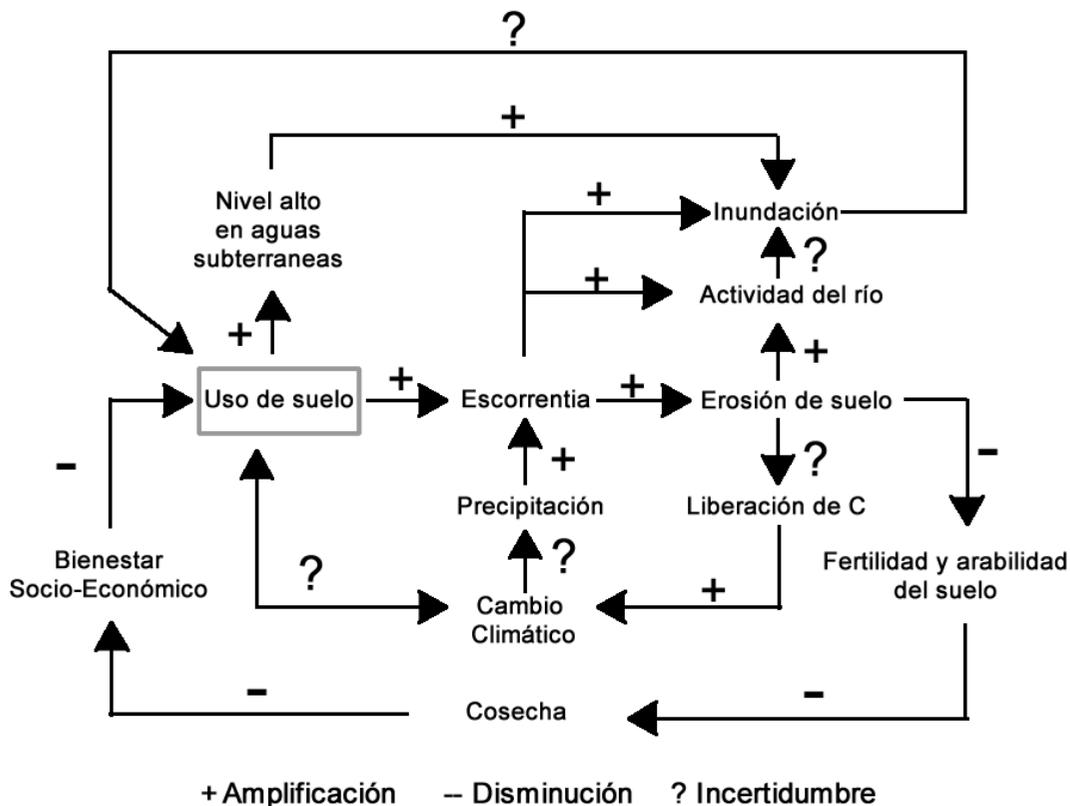
Las presas generalmente reducen la variabilidad del flujo y estabilizan los regímenes de los mismos. Sin embargo, algunas presas o embalses pueden incrementar la variación del flujo de forma parcial, particularmente aquellas que almacenan agua con fines de generación eléctrica, las cuales modifican el flujo aguas debajo de la presa de forma casi instantánea en respuesta de la demanda eléctrica en horas pico o bajo condiciones extraordinarias de demanda. Vörösmarty *et al.*, (2003) reportan que de 4-5 x 10<sup>9</sup> toneladas de material erosionado el 30 % del flujo particulado es actualmente acumulado detrás de los reservorios; Poff *et al.*, (2003) estima que cerca del 60 % de las pérdidas de los suelos provenientes de campos de cultivo es depositado en las colinas adyacentes, en planicies de inundación y detrás de las presas, en las corrientes que conducen a estas.

## Respuestas morfológicas y sedimentológicas en las corrientes debido al impacto humano

La Tabla 3 ilustra los mayores tipos de influencia, directos e indirectos, además da un ejemplo de la magnitud de dichas influencias. Este amplio rango de causas que provocan cambios en los canales, están interrelacionados de tal forma que la diversidad de efectos varía en función de la magnitud y frecuencia con las que estos se presentan; a pesar de que la mayoría de los cambios que se han reportado están relacionados con los cambios en la capacidad del canal o en la sección transversal del mismo (Gregory, 1987).

La Figura 8 muestra los posibles escenarios que resultan del cambio de magnitud y sentido de las variables relacionadas con el uso del suelo, dentro de un sistema fluvial o cuenca hidrológica. Esta es más fácil de entender si se parte del concepto de Estado (dentro del modelo PER), en el cual, el uso que se le da al suelo representa esta variable del modelo y muestra todas las conexiones que lo configuran dentro del sistema fluvial; una visión distinta pero similar en cuanto a la forma de conectar el sistema, resulta si se presenta el uso del suelo como la variable de respuesta; sin embargo es difícil describirlo porque existen muchas más variables que son impactadas que aquellas que podemos controlar o presionar.

**Figura 8. Las interacciones de las presiones humanas impactan tanto positiva como negativamente al sistema de estudio. Según sea la dinámica desarrollada en el uso del suelo tendrá una repercusión en las tasas de erosión del suelo. La intensificación del uso de suelo puede conducir a una amplificación de los mecanismos de respuesta. (Modificado de Dotterweich, 2008).**



## Capítulo 4

**Tabla 2. Muestra las diversas causas y variables que afectan a los sistemas fluviales, utilizando como geoindicador principal los canales de corriente. La descarga es representada con la letra H, donde los incrementos de flujo son designados por H+, y el decremento del mismo por H-. De forma similar, el transporte de sedimentos, representa su incremento con L+ y su decremento con L-. (Modificado de Gregory, 2006)**

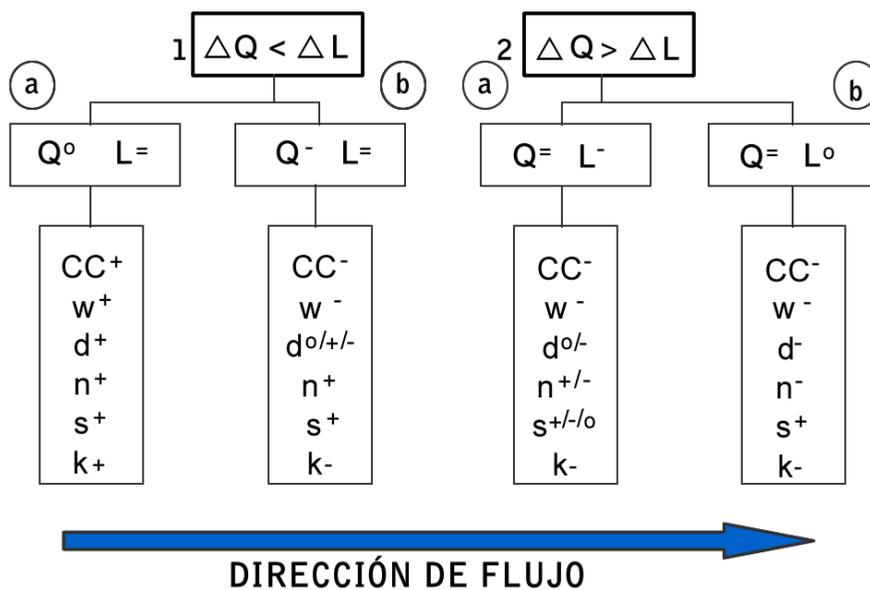
Qué causa el cambio	Procesos: Hidrológico (H), Sedi- mentario (L).	Qué puede cambiar	
		Canal de corriente	
Canal		Ajuste local	Ajuste espacialmente extensivo
<b>Sección transversal del canal</b>			
Construcción de presa	H- L- luego S+	Erosión aguas abajo de la cortina.	Aguas abajo la corriente puede haber reducido la capacidad de canal, sin embargo esta puede funcionar como una trampa para los sedimentos.
Derivación de flujo	H-	Denostación después de la derivación, posible erosión cerca del lugar donde el drenaje regresa al canal.	No aplica.
Flujo de retorno, drenajes y desembocaduras	H+		No aplica.
Cruce de puente	H+	Erosión alrededor de los pilares.	No aplica.
Desagües bajo caminos y carreteras	H+	Erosión al final de la corriente que desemboca.	No aplica.
<b>Alcance de canal</b>			
Limpieza de detritos y vegetación del canal.	L+	El transporte de sedimentos incrementa y puede presentar una aceleración en la erosión.	No aplica.
Pastoreo	L+	Posible erosión localizada en el talud y canal.	No aplica.
Construcción de embalse y dique	H+		Posibles efectos aguas abajo.
Canalización	H+ L+		El incremento de la velocidad del flujo, puede conducir a efectos aguas abajo. Posible recesión de la pendiente aguas arriba de la canalización.
Desmonte de la vegetación ribereña	L+	Posible erosión localizada en el talud y canal.	No aplica.
Remoción de sedimentos, extracción de material del lecho	L+	Ajustes localizados en el canal.	Transferencia de sedimentos aguas abajo o posible afectación de la morfología del canal debido a la erosión.
Adición de sedimentos	L+	Posible sedimentación localizada.	Puede ocurrir una sedimentación aguas abajo y como también aguas arriba.

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Invasión de especies vegetales exóticas	L-	Posible estabilización de secciones del canal y talud.	Puede reducir la transferencia de sedimentos aguas abajo.
Reforestación	L- pero puede incrementar por segmentos.	Posible disminución progresiva de la capacidad del canal, pero depende de la administración de la red de drenaje asociado a este.	
Medidas de conservación	H- L-	Posible disminución progresiva de la capacidad del canal, pero depende de la administración de la red de drenaje asociado a este.	
Restauración y técnicas similares	H- L-	Diseño de las características del canal.	Reducción de la erosión y depósito aguas abajo.
<b>Red de drenaje de la cuenca</b>			
Esquema de drenaje	H+	Posible ajuste en canal de donde el flujo ha sido extraído.	No aplica.
Drenaje con fines de agricultura	H+	Posibles efectos localizados donde el drenaje desemboca en el canal.	No aplica.
Redes de irrigación	H-	Posible ajuste en el canal donde el flujo es extraído.	Si se tienen diversas ubicaciones donde el flujo es extraído, puede conducir a efectos notables.
Zanja	H-	Posible ajuste en el canal, como resultado del flujo extraído.	No aplica.
Drenaje de escorrentía	H+	Posible erosión alrededor del área de descarga.	Si se tienen numerosos desembosques se puede ver incrementado los picos de flujo, induciendo la erosión aguas abajo.
<b>Espacial</b>			
Deforestación	H+ L+		El desarrollo de una cárcava puede ocurrir debido a la recesión de la pendiente aguas arriba. Mientras que aguas abajo puede cambiar el canal y también puede incrementar su capacidad dependiendo de su disponibilidad de recepción de sedimentos. <sup>1</sup>
Pastoreo	L+	Efectos locales por degradación de margen del canal.	No aplica.
Fuego, incendio	H+ L+	El canal cambia después de eventos relacionados con fuego.	No aplica.
Agricultura y arado	H+ L+	Efectos localizados donde se unen las corrientes tributarias.	No aplica.
Medidas de conservación, sobre el uso de suelos	H- L-	Disminución progresiva de la capacidad del canal, pero depende del manejo de la red de drenaje asociado a este.	
Construcción de edificios	L+	Afectación al canal debido a las grandes cargas locales de sedimento.	El drenaje temporal complementa la red de drenaje.

## Capítulo 4

**Figura 9. Escenarios de ajustes en el canal aguas abajo de la cortina de la presa, como respuesta a los cambios relativos a: el caudal o gasto (Q) y carga de sedimentos (L).** Donde los cambios en el canal están dominados en **1** por la reducción en L, mientras que en **2** existe una regulación de Q. Las condiciones extremas se presentan en los escenarios **1a** y **2b**, de la secuencia normal de cambios en el canal: **1a-1b-2a-2b**, la cual se presenta u ocurre hipotéticamente aguas abajo de la cortina de la presa. Es importante hacer notar que la velocidad de las transformaciones son dependientes y directamente proporcionales a la velocidad de corriente y a los gradientes que presionen en la modificación y esculpido del sistema fluvial, mientras que la magnitud de los efectos y/o reacciones decrecen inversamente con el transcurrir normal del flujo de la corriente, es decir, el impacto de la presión ejercida por una presa decrece aguas debajo de la cortina del embalse para un sistema fluvial. Los superíndices indican la magnitud del cambio: **(o)** significa que no hay cambio, **(+)** incremento, **(-)** disminución y, **(=)** una disminución mayor. Las variables morfológicas son: **(Cc)** capacidad de canal, **(W)** anchura del canal, **(d)** profundidad del canal, **(n)** rugosidad, **(S)** pendiente y **(K)** transporte de material. (Modificado de Schumm, 1969; Petts y Gurnell, 2005).



### Presas y morfología

#### Estudio de la transformación del canal

El primer punto a considerar en la predicción del cambio del canal, es el referente al balance de masa de sedimentos que fluye o se transporta por el sistema y sus alrededores. Generalmente, para cumplir con este fin, se subdivide el sistema en secciones, con la finalidad de caracterizar o señalar una deficiencia, aumento o equilibrio, de forma localizada.

La importancia de lo anterior se debe a que el “des-

balance” en la carga de sedimentos de un canal, provoca cambios o transformaciones considerables, por lo que la alteración en la concentración de los sedimentos o carga suspendida, puede ser considerada como la primera extensión de la degradación (Stevaux *et al.*, 2009).

La certeza o incertidumbre a la hora de realizar los balances de masa es muy variable y depende en gran medida de la configuración del drenaje de la cuenca, es decir, el grado de jerarquías que describan el drenaje, su densidad y por supuesto de cómo

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Tabla 3. Descripción de los escenarios que se presentan al presionar un sistema fluvial con el desarrollo de una presa (a partir de Petts y Gurnell, 2005).**

Escenario	Condición y/o modificación	Efecto
1	Muestra los efectos de reservorios en ríos con gran cantidad de carga de sedimentos.	Estos reservorios poseen un impacto pequeño sobre las inundaciones; la vegetación ribereña muestra un crecimiento mínimo.
1a Condiciones extremas	Ocurre en el lecho, cuando el agua está libre de sedimentos, ésta produce una degradación.	La mayoría de las presas impactan de esta forma, los cambios son más dramáticos en los meandros, lechos rocosos y canales.
1b	La pendiente puede verse disminuida por la degradación. Lo que produce canales con dimensiones reducidas.	Aunque ocurre una disminución de pendiente, los efectos de la sedimentación lateral son apreciables, lo cual da pauta a la construcción de nuevas planicies de inundación a elevaciones más bajas que las ya formadas.
2	Muestra los impactos de las presas sobre los ríos, cuando se reduce la carga de sedimentos o cuando la regulación del flujo es extrema.	El ajuste del canal está caracterizado por la reducción en la sección transversal del canal (ancho) y por tanto la capacidad del mismo.
2a	Existe una reducción en la carga de sedimentos, que acompaña a la regulación extrema del flujo.	La capacidad del canal se ve reducida, lo cual se ve acompañado de un estrechamiento y un posible depósito de sedimentos en el lecho, lo cual puede afectar la pendiente y rugosidad del mismo, con lo que finalmente, el transporte se ve reducido.
2b Condiciones extremas	La regulación del flujo extrema, no es acompañada de cambio alguno en la carga de sedimentos, lo cual rara veces ocurre en la naturaleza, no sin ocurrir antes el escenario 2a.	Existe un cambio negativo o de reducción en la capacidad del canal, ancho, profundidad, rugosidad y transporte, excepto para la pendiente del lecho, el cual aumenta. Lo que indica finalmente que se ha alcanzado un estado de cuasi-equilibrio con el nuevo nivel "base".

esté configurado o segmentado el sistema para su estudio. Por tanto se entiende que algunas partes del canal pueden ser más o menos susceptibles para ciertas variables, como podría ser la anchura del canal y la elevación del lecho, es decir, las tasas y magnitudes de los cambios en una parte del canal, no son necesariamente representativos de la magnitud y tasas de cambio para otras partes del canal.

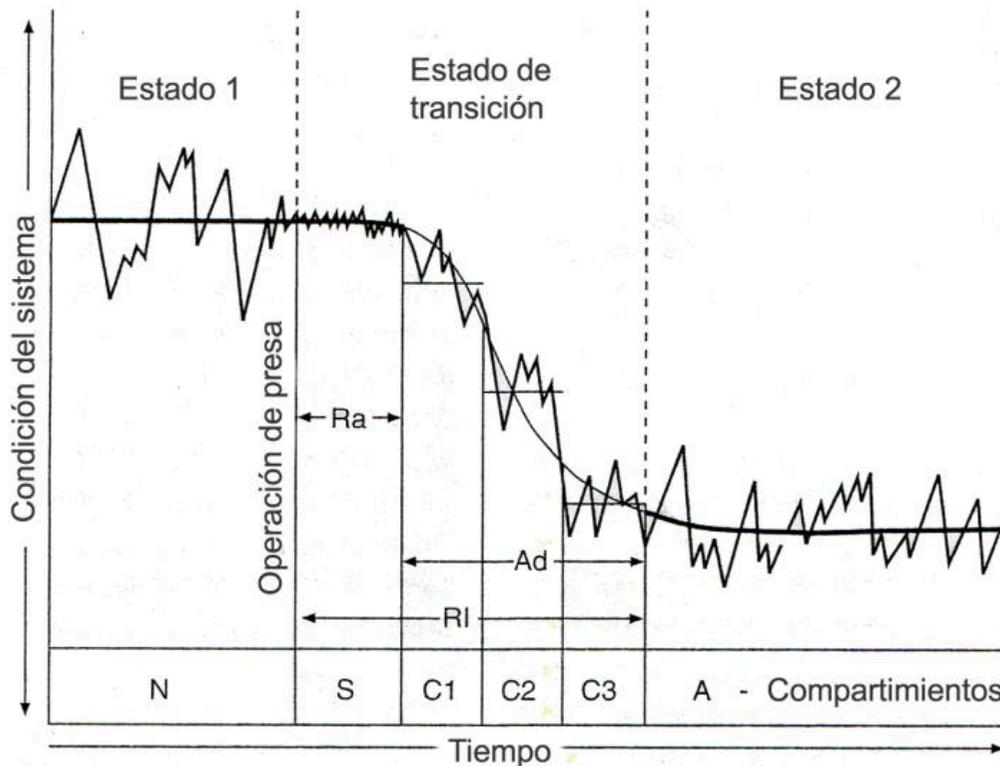
A finales de 1970 (Petts y Gurnell, 2005) se había establecido un modelo bastante complejo de los ajustes del canal frente a los distintos estímulos que pudieran ocurrir, o por lo menos los conocidos has-

ta entonces, entre los que se incluye la elaboración y operación de una presa. Este modelo incluye diferentes etapas finales, consecuencia de las distintas combinaciones de cambio en el régimen de flujo y carga de sedimentos (Figura 9) y las distintas tasas y secuencias temporales de cambio (Figura 10).

La Figura 9 está compuesta por cuatro escenarios, los cuales se adaptan a la observación empírica del trabajo desarrollado por Schumm (1969) en diversas cuencas de los Estados Unidos de América. La Tabla 3 recoge la descripción de los escenarios. La secuencia de cambios (1a-1b-2a-2b) puede ser en-

## Capítulo 4

**Figura 10. Trayectoria hipotética de la transformación posterior a la construcción de una presa. Los cambios van desde el estado 1 o régimen natural (N) hacia el estado 2 o alterado (A), pasando a través de un periodo de relajación (R1) conformado por una fase de reacción (Ra) y una fase de ajuste (Ad). La fase de relajación comprende además una secuencia de estados o fases transitorias. Las cuales incluyen una fase de acomodo (S), en la cual el control o regulación estricta de la corriente se adapta a su canal original, para entonces comenzar con las fases de cambio en el canal (C1 a C3), en estas fases se regulan las cargas de sedimentos ad hoc al gasto y nueva secuencia del flujo. (Modificado de Petts y Gurnell, 2005).**



contrada aguas abajo a lo largo de un río o corriente regulada con una secuencia reiniciada<sup>(5)</sup>, como ocurre por ejemplo: cuando una corriente posee sedimentos fácilmente erosionables (2b-1a-1b-2a-2b). Debajo de las confluencias de las corrientes tributarias, se pueden apreciar cambios locales, mismos que pueden seguir la siguiente secuencia 1b-2b-2a-1b.

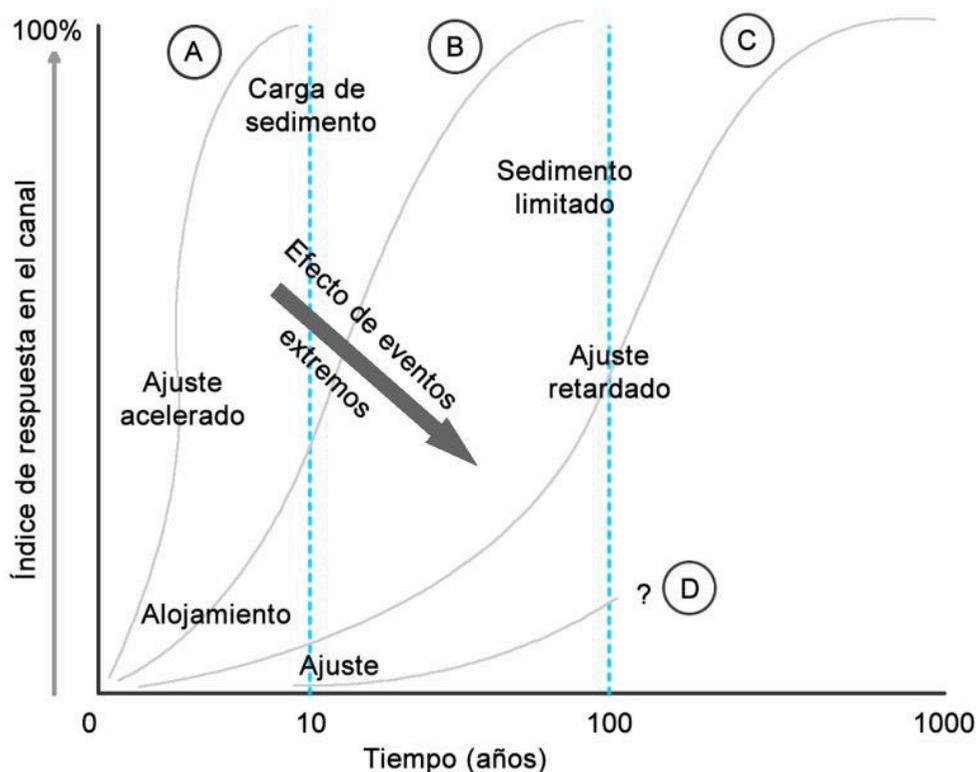
Debe tomarse en cuenta casos excepcionales en los que la inclusión de una presa en un sistema fluvial no modifica sus regímenes de erosión, tal como

ocurre en corrientes con lechos de sedimentos muy gruesos, cohesivos o con una vasta población de vegetación ribereña (Petts y Gurnell, 2005), siendo el único cambio aparente el referente a la reducción del nivel máximo normal de las aguas de la corriente. En estos casos, se necesita de una avenida extraordinaria para que se lleve a cabo un cambio o alguna modificación en el canal, debido a la relación erosión-depósito.

Los cambios en los canales se deben a distintos mecanismos, configuraciones y escalas, por lo

<sup>(5)</sup> En este trabajo se entiende como secuencia reiniciada, a aquel sistema fluvial que acaba de sufrir un evento extraordinario que borre los rasgos de trabajo del flujo normal del mismo.

**Figura 11. Posibles trayectorias que puede seguir un sistema fluvial para llegar al estado 2 o alcanzar un nuevo cuasi-equilibrio, considerando la intervención de la vegetación ribereña.** En (A), el sistema fluvial experimenta un cambio rápido debido a la repoblación de la vegetación, la cual encuentra en este tipo de ajuste o trayectoria las condiciones óptimas o por lo menos suficientes para crecer y poblar el sistema. El papel que juega la vegetación tiene un efecto directo en los patrones de sedimentación–erosión durante la transformación del canal. En (B), se tiene un contenido considerable de materia orgánica procedente de la vegetación, el cual sirve para atrapar sedimentos y soportar el desarrollo de la vegetación por núcleos o sectores. La trayectoria (C), nos señala que el crecimiento de la vegetación es limitada ya que la baja cantidad o control de sedimentos priva de soporte a las semillas, dispersándolas e incluso removilizándolas una vez germinadas. La última trayectoria (D), nos señala cambios extremadamente lentos, por lo cual carecen de interés, por lo menos para ser considerados en los geoindicadores. (Modificado de Gurnell y Petts, 2002).



que las respuestas de los canales con el tiempo pueden ser simples o complejos (Figura 10). Para abordar esta complejidad o simplicidad en las manifestaciones que presentan los canales, podemos dividir el proceso de respuesta en un tiempo de reacción y en otro de relajación, los cuales deben de reflejar tanto las magnitudes, como las frecuencias de la efectividad aplicada al trabajo

geomorfológico de los eventos y de las condiciones en que ocurren al momento del inicio de su actividad en la presa.

Generalmente, entre mayor sea la carga de sedimentos, mayor será la velocidad en los procesos morfológicos (Wang *et al.*, 2007). Mientras que la pérdida o interrupción de las inundaciones máxi-

## Capítulo 4

**Tabla 4. Posibles trayectorias de cambio morfológico en un canal, su asociación vegetal y el mecanismo que este sigue (a partir de Petts y Gurnell, 2002).**

Trayectoria	Velocidad de cambio	Asociación	Mecanismo
A	rápida	Alta carga de sedimentos y disponibilidad de piezas de vegetación con la capacidad de crecer.	Este material vegetal crece rápidamente, debido al soporte de la rápida acumulación de sedimento fino, el cual ofrece protección a las semillas y brotes.
B	media	Baja carga de sedimentos y el material vegetal disponible es bajo o muerto.	El material vegetal muerto actúa como una trampa de sedimentos y material orgánico, estimulando el desarrollo de las semillas y brotes.
C	baja	Ausencia de material vegetal y un depósito difuso de sedimentos.	El material vegetal crece en densidades bajas y muy lentamente, debido a las condiciones precarias de alimento.

mas anuales, se traduce en la desaceleración en la migración lateral del cauce del río en las llanuras de inundación (Shields *et al.*, 2000).

### Regulación del flujo

Petts (1984) demostró que la regulación del flujo de los ríos que claramente presentan las presas, representa la más grande influencia de interferencia hidrológica hecha por el hombre, influenciando un amplio espectro de las escalas tanto espaciales como temporales.

Estudios recientes (Stevaux *et al.*, 2009) han mostrado un nuevo tipo de proceso erosivo inducido por las presas. El mecanismo erosivo se crea por la oscilación diaria de los niveles de agua, debida a la operación normal de una presa, la cual genera altos gradientes hidráulicos en el nivel del agua subterránea, incrementando la velocidad de flujo del agua superficial que impacta las formas en el cauce del río. Wellmeyer *et al.*, (2005) encontró un patrón inducido por las presas que muestra que durante los

primeros cuatro años de operación existe una tendencia a aumentar el tamaño en la granulometría del material del lecho de manera significativa y al cabo de cuatro a seis años se comienzan a depositar gravas de forma discreta pero a distancias considerables de 25 a 30 km aguas abajo.

### El papel de la vegetación ribereña

La mejor forma de explicar el papel que juega la vegetación ribereña en los sistemas fluviales, es quizás por medio de la Figura 11, la cual muestra las tres posibles trayectorias que sigue un cambio de canal (A, B y C), para corrientes no reguladas y su explicación en la Tabla 4 (Gurnell y Petts, 2002).

### Geoquímica: fondo, anomalías y posibles fuentes

Los sedimentos pueden actuar como contenedores potenciales o como fuentes de varios contaminantes en los sistemas fluviales (Adams *et al.*, 1992; Christophoridis y Fytianos, 2006) bajo distintas condiciones ambientales.

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Los fenómenos de almacenamiento y dispersión de los metales en sedimentos en los sistemas fluviales, pueden vincularse directamente a los procesos de transporte de sedimentos (Walling *et al.*, 2003), tipo de canal y los procesos de sedimentación que se lleven a cabo en la planicie de inundación (Middelkoop, 2000) y regímenes de inundación (Dennis *et al.*, 2003). Esto sucede así ya que comúnmente más del 90 % de los metales contaminantes en los ríos son transportados en una forma asociada a partículas movilizadas por la corriente del río u otro nivel dentro del sistema fluvial (Martin & Meybeck, 1979), de ahí que se sigan los mismos patrones de transporte que en la carga de sedimentos naturales en los ríos.

### **Dispersión de metales en sedimentos en cuencas hidrológicas**

La habilidad para identificar y cuantificar el aporte de metales desde cada fuente(s) es un elemento clave para un manejo efectivo de las cuencas y para el control de la contaminación en los ambientes acuáticos. En la actualidad existen múltiples técnicas de trazado, que se han desarrollado con la finalidad común de localizar las fuentes de emisión de contaminantes asociados con los metales y sedimentos tanto en los canales de los ríos, en secuencias de depósito, así como en las planicies de inundación.

Por medio de análisis espectral, es decir, por el estudio óptico de las longitudes de ondas del espectro de luz, utilizando sensores remotos no es posible detectar concentración de metales, sin embargo podemos utilizar la sensoría remota para determinar los

minerales que albergan estos contaminantes (Ferrier, 1999). Existe en la actualidad una librería con más de 1,500 firmas espectrales de minerales, componentes orgánicos y volátiles, vegetación y materiales manufacturados que pueden asociarse con los metales pesados en los sistemas fluviales. Esta librería ha sido desarrollada por la entidad *U.S. Geological Survey* (USGS). Por ejemplo: El cadmio en su forma más común, greenockita (CdS), se encuentra casi siempre asociado con la esfalerita (ZnS), por lo que el cadmio se recupera principalmente como subproducto de la minería, fundición y refinación del zinc, y en menor grado de la del plomo y cobre.

### **Erosión**

Aunque la resistencia a la erosión del suelo depende en parte de su posición topográfica, pendiente, litología, clima, etcétera, las propiedades del suelo son sin duda las más importantes.

El grado de erosión varía con la textura del suelo, la estabilidad de sus agregados, su capacidad de infiltración, contenido químico y materia orgánica.

Los constituyentes químicos y orgánicos del suelo son importantes debido a su influencia sobre la estabilidad de los agregados. Los suelos con menos de un 3.5 % de contenido orgánico pueden ser considerados como erosionables (Evans 1980). Por otra parte Voroney *et al.*, (1981) sugiere que el grado de erosión de los suelos disminuye proporcionalmente con el incremento del contenido orgánico de los suelos sobre un rango de 0 – 10 %. Por otra parte Ekwue (1990) encontró que la disgregación del sue-

## Capítulo 4

**Tabla 5. Relación entre el porcentaje de cubierta vegetal y el porcentaje de reducción en la pérdida de suelos (Elwell, 1980).**

% de cubierta vegetal	100	80	60	40	20	10	5
% de pérdida de suelos	0.5	1.5	5	10	32	60	70

lo por el impacto de las gotas de lluvia disminuye exponencialmente con el incremento del contenido orgánico sobre un rango de 0 – 12 %.

Un exceso de carbonato de calcio en las fracciones de arcilla y limo del suelo también conducen a una alta erosión (Merzouk y Blake, 1991). Existen muchos mecanismos que se han propuesto para determinar la respuesta del suelo frente a factores que conducen a la erosión de los mismos. Desafortunadamente no existe un acuerdo entre los investigadores para señalar cuál es el mecanismo más apropiado para evaluar la estabilidad del suelo. Diversos índices tal como el de inestabilidad, el índice pseudo-textural de agregados, etc., se basan en la ruptura de los agregados como mecanismo precursor de una pérdida de suelos.

### Vegetación

La vegetación o la cubierta vegetal reduce las tasas de erosión del suelo; su efectividad depende de la altura y continuidad de la vegetación. Evidencias experimentales indican que la relación erosión-cubierta no es lineal. Al incrementar la cubierta vegetal desde cero a un valor correspondiente, existe una rápida disminución en la pérdida de suelos. La Tabla 5 muestra la relación erosión-cubierta vegetal generalizada. De esta misma se obtiene que una

medida adecuada de prevención para la pérdida de suelos, sea poseer una cubierta vegetal de por lo menos un 60-70 % del área considerada, por lo que este es un esquema de fácil seguimiento por medio de la sensoría remota, lo que le convierte en un geoindicador de gran importancia y significado.

### La dinámica del proceso de erosión del suelo

La escala es un punto crítico en la modelación de la erosión del suelo y en el soporte de las políticas sobre el manejo y conservación del área que se estudia, ya que esta influencia el desarrollo y selección de los modelos a emplear, así como la disponibilidad y calidad de los mismos (Renschler y Harbor, 2002).

### Variabilidad temporal y espacial

La variabilidad temporal del clima, especialmente de las tormentas, es extremadamente importante para evaluar la tasa de erosión del suelo (Renschler *et al.*, 1999). El total de erosión del suelo puede en algunos casos ser dominada por algunos eventos extremos, de ahí que el monitoreo, así como algunos estudios de simulación, necesiten desarrollarse en períodos considerablemente largos para capturar estos eventos erosivos; Baffaut *et al.* (1996) recomienda considerar mínimo de 50 a 100 años. Sin embargo, los eventos de baja magnitud y alta fre-

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Tabla 6. Escalas de interés espacial y temporal, así como sus variables y propiedades que dominan los procesos que se desarrollan en la escala indicada (Renschler y Harbor, 2002).**

Propiedad:	Terreno	Ladera	Campo	Granja	Divisorias	Región
<b>Topografía</b>	Microrelieve	Forma de pendiente		Red de drenaje		
<b>Uso de suelo</b>	Cubierta vegetal		Tipo de vegetación		Patrones de uso	
<b>Suelos</b>	Textura del suelo			Litología / geología		
	Agregados		Tipo de patrones del suelo			
<b>Clima</b>	Observaciones detalladas			Red de estaciones meteorológicas		
<b>Proceso:</b>						
<b>Lluvia</b>	Distribución temporal			Distribución espacial		
<b>Balance hídrico</b>	Infiltración, evaporación, transpiración					
<b>Escorrentía</b>	Flujo por surcos			Flujo en canal		
<b>Erosión</b>	Disgregación	Surcos	Erosión de canal			
	Interconexión de surcos		Cárcava	Trasladación de canal		
<b>Transporte de sedimentos</b>	Flujo superficial		Flujo concentrado			
	Depósito de corto plazo			Depósito de largo plazo		
<b>Área de interés</b>	< 100m <sup>2</sup>	< 1 Ha	< 1 km <sup>2</sup>	< 100 km <sup>2</sup>	< 10,000 km <sup>2</sup>	

cuencia pueden ser más significativos para tasas de erosión a largo plazo.

Las variables que controlan los procesos erosivos a distintas escalas (incluyendo la variabilidad espacial y las interacciones físicas, químicas y biológicas relevantes) se encuentran resumidas en la Tabla 6.

A diferentes escalas, diferentes grupos de procesos son los que dominan, por lo cual un enfoque efectivo de cualquier modelo cambia con respecto a la escala. Por ello se debe prestar especial atención al problema de que se trate, ya que si este no está en la misma escala que el conjunto de geoindicadores, ajustar la escala a cualquiera de las variables que pretenden medir, resultará en un modelo y/o proceso realmente complejo que no aporta resultados lógicos o plausibles (Renschler *et al.*, 1999).

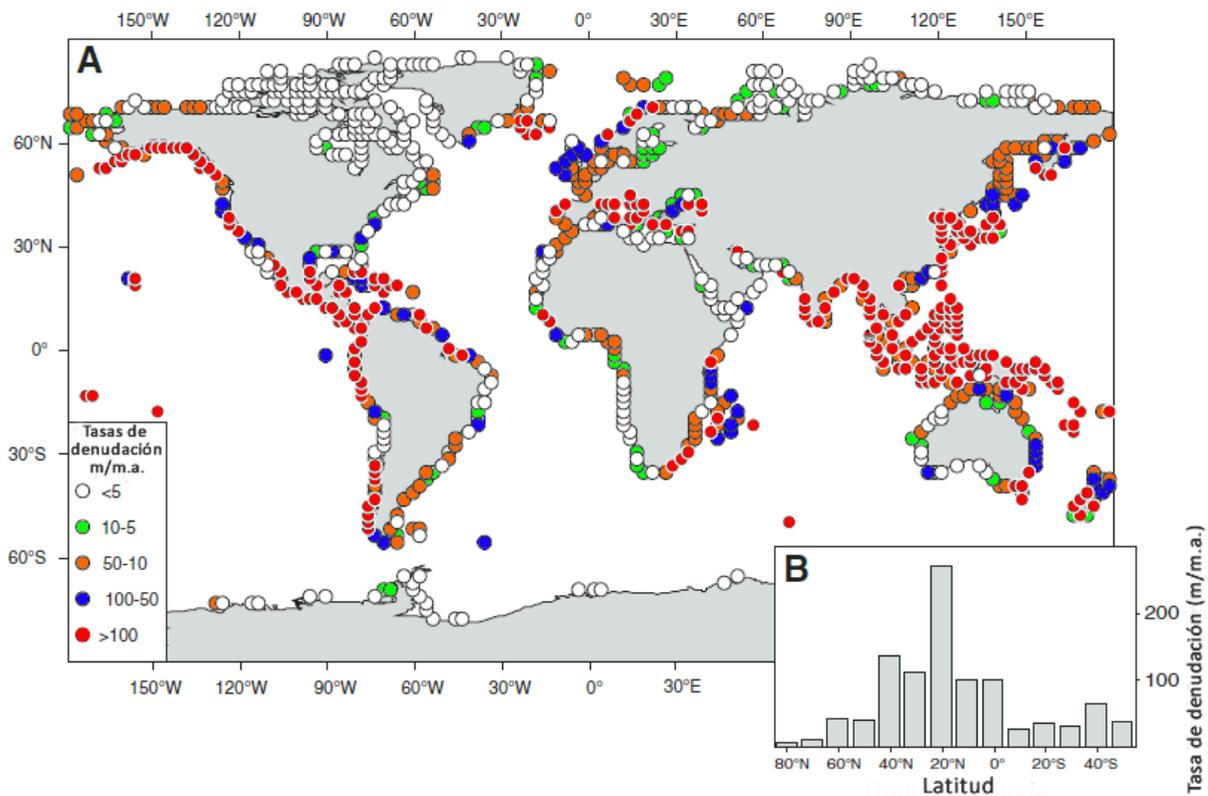
### El contexto global de la erosión

Una gran cantidad de estudios han llegado a la conclusión de que las tasas de intemperismo químico depende directamente del clima y el tipo de roca, mientras que las mayores tasas de erosión mecánica son un reflejo de la combinación de influencias de la elevación y/o el relieve y de la disponibilidad de los cuerpos de agua para que ocurra el transporte, así como de los rangos promedio de temperatura en el ambiente (Wilkinson y McElroy, 2007). La influencia de la topografía y el clima sobre la erosión continental es claramente evidente en la distribución global de los sedimentos que son depositados en los océanos (Figura 12).

Varios estudios han establecido relaciones significativas entre la carga de sedimentos que un río transpor-

## Capítulo 4

**Figura 12. Distribución espacial de las tasas de denudación continental (m/m.a.). (A) Valores de los flujos derivados de las masas suspendidas en las corrientes ribereñas según Ludwing *et al.* (1996), considerando una carga suspendida/lecho de 10 Gt y una tasa de carga particulada/solución con valor 6 Gt. Esto representa un flujo de red de intemperismo de ~21 Gt/año derivado en su mayoría por la superficie continental descubierta (~118 x 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>), lo cual requiere una tasa de denudación promedio de ~71 m/m.a. (es importante notar que las tasas más altas de producción de sedimentos ocurren a través de la región costera a bajas latitudes y adyacentes a regiones de rápida ascensión). (B) Distribución de las tasas de denudación en función de la latitud. (Modificado de Wilkinson y McElroy, 2007)**

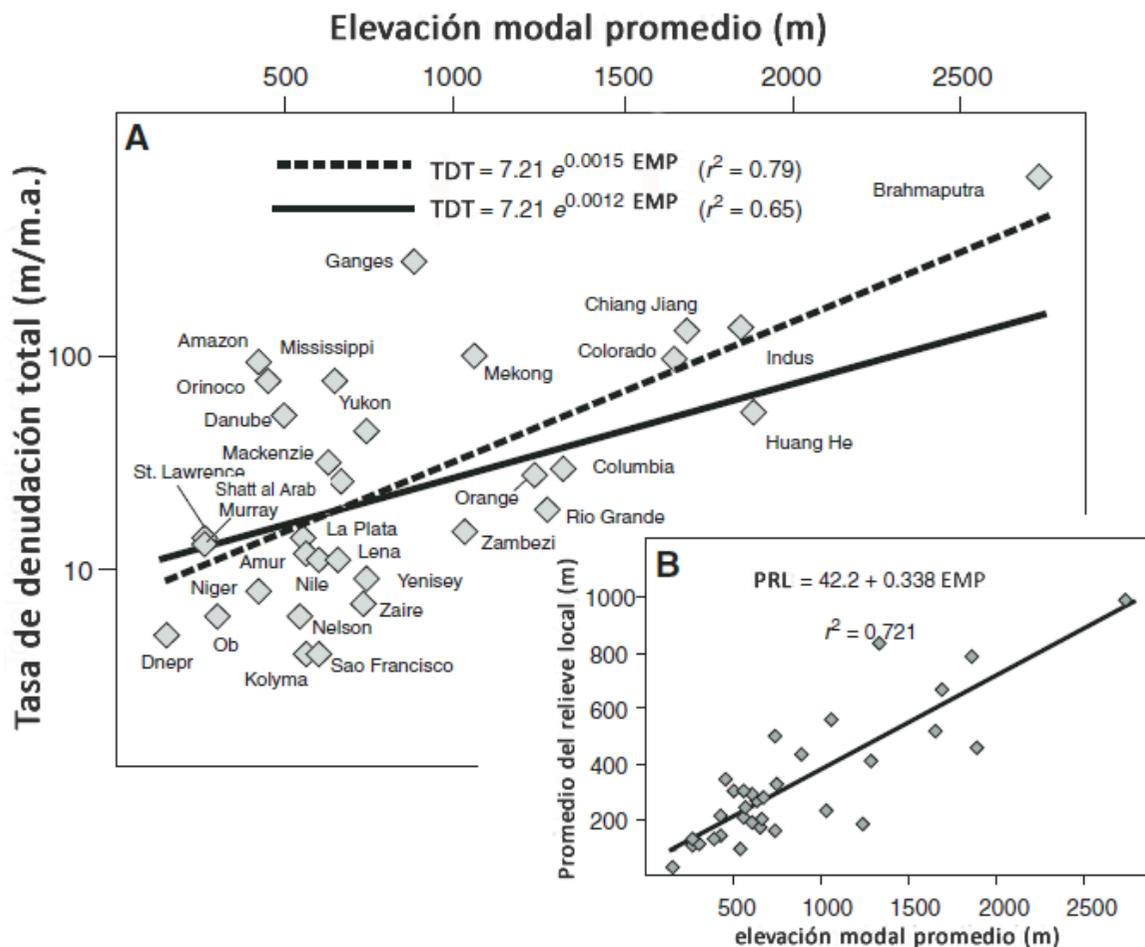


ta y algunos índices de la topografía de sus cuencas, las cuales poseen una variabilidad descrita con base en alguna función matemática que satisface la dinámica entre las tasas de erosión y la elevación promedio, el relieve local y la pendiente de la cuenca (Figura 13). Montgomery y Brandon (2002) sugieren que la naturaleza de la relación ya sea lineal, exponencial, y/o a cierta potencia, para las tasas de erosión de un área en particular, depende de las distintas variables que prevalecen y dan forma a dicho sitio.

Considerando las relaciones entre la elevación de la superficie y las tasas de denudación del trabajo de Summerfield y Hulton (1994), las tasas de erosión más bajas (7.21 m/m.a.) ocurren sobre las superficies cercanas al nivel del mar, donde el relieve y las pendientes son posiblemente las mínimas; por encima de esta elevación, las tasas de erosión se incrementan en un ~15 % por cada metro de elevación incrementado (Figura 14).

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Figura 13. Tasas de denudación de distintas cuencas de ríos y datos topográficos de Summerfield y Hul-ton (1994). (A) Relación entre la elevación modal promedio (EMP) y la tasa de denudación total (químico y mecánico) (TDT) para 33 grandes ríos, los cuales drenan un ~39 % (52 x 106 km<sup>2</sup>) de la superficie expuesta del planeta. La línea discontinua es la que mejor se ajusta a los datos, como una función exponencial (la tasa de denudación se incrementa un ~15 % con cada metro de elevación incremen-tado); por su parte, la línea continua representa un mejor arreglo con las estimaciones actuales para la carga de algunos grandes ríos, con una producción de sedimentos global actual de ~21 Gt/año. (B) Relación lineal entre la elevación modal promedio y el promedio del relieve local (PRL). (Modificado de Wilkinson y McElroy, 2007).**



A escala mundial, la retención de sedimentos por presas pequeñas (~4 Gt/año) es despreciable en comparación con la cantidad que es aportada por las tierras de cultivo (~63 Gt/año) (Wilkinson y McElroy, 2007). Incluso si se compara con distintas eras geológica, se verá que ninguna de ellas sobrepasa las tasas de erosión anual actual de los ríos del

planeta y mucho menos la tasa de erosión debido a las tierras de cultivo; para obtener el flujo de masa anual perdido a causa de las tierras de cultivo, sería necesario sumar los flujos de masa desde el Triásico Inferior (hace ~251 m.a.) hasta el Plioceno (hace ~2.6 m.a.), es decir un periodo de ~248.4 millones de años, (Figura 15).

## Capítulo 4

Figura 14. Áreas continentales libres de hielo (expuestas) de GTOPO30 (líneas discontinuas; eje izquierdo), y las tasas de erosión subterránea anticipadas (línea sólida; eje derecho) como una función de la elevación (eje horizontal), y la relación entre la elevación modal promedio (EMP) y la tasa de denudación (TD). Los rombos representan las tasas de denudación de las áreas de cuenca de diversos ríos (Summerfield y Hulton, 1994; Figura 13). La línea sólida es una extrapolación de estos datos sometidos por las cargas de sedimentos de los ríos a nivel global (Syvitski *et al.*, 2005; línea sólida en la figura 13). (Modificado de Wilkinson y McElroy, 2007).

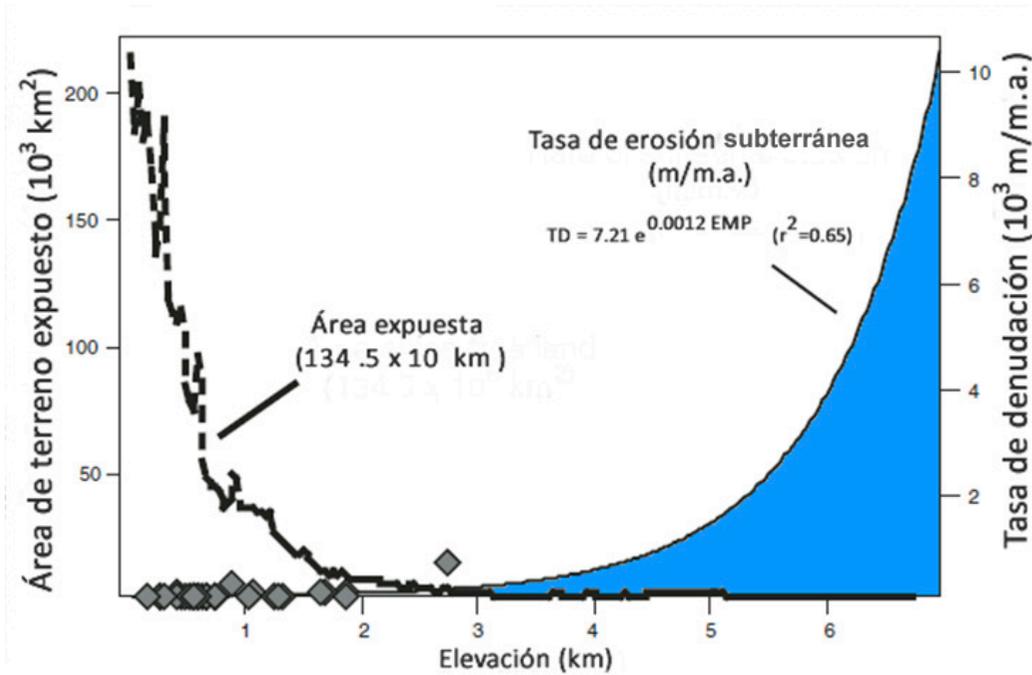
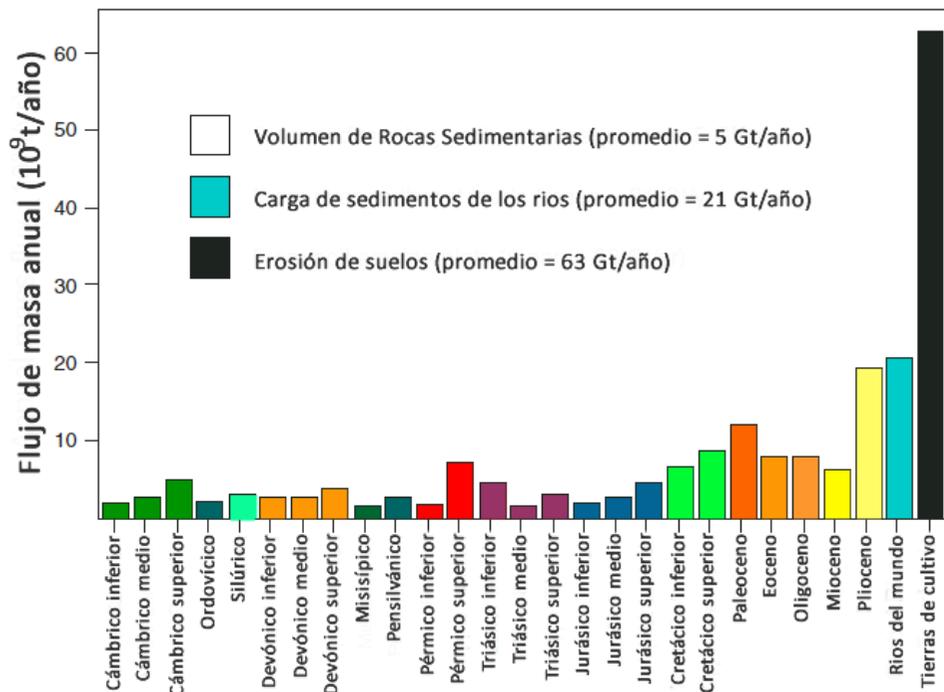


Figura 15. Tasas anuales de erosión global y datos de los volúmenes de rocas sedimentarias (barras de colores), la carga de los ríos del mundo (barra azul), y la pérdida de tierras de cultivo (barra negra). Notar que la tasa de erosión inferida para la pérdida de suelo es ~3 veces la sugerida para la carga de sedimentos de los ríos del mundo y de los volúmenes de sedimento aportados durante el Plioceno (Wilkinson y McElroy, 2007).



## Cambio geomorfológico, de planta y en los patrones del sistema fluvial debidos a la presión de la construcción de un embalse

### Tipos de degradación

La degradación que ocurre en las corrientes puede avanzar en la dirección de la corriente o en sentido contrario, dependiendo de la causa básica que la origina (Galay, 1983). Si la reducción en la pendiente es causada por la descarga de la carga suspendida ( $L_s$ ), la reducción del material del lecho de tamaño medio ( $D_m$ ) o un incremento de  $Q$  al principio de la cabecera de corriente conducirá a un proceso de degradación aguas abajo; por otra parte, si la pendiente experimenta un incremento al final de la corriente, un incremento del caudal aguas arriba  $Q$ , el gasto de salida de la cuenca ( $Q_s$ ) y el diámetro del material del lecho ( $D$ ) permanecerán sin cambio, sin embargo se llevará a cabo un proceso de degradación aguas arriba. Otro escenario en el cual existe una degradación aguas arriba, ocurre si el nivel de agua del cuerpo en donde la corriente deposita los sedimentos modifica negativamente su valor.

Es importante reconocer que los procesos de degradación aguas arriba suceden en lapsos menores que los que se llevan aguas abajo, esto es debido a la sensibilidad sobre el material del lecho y su dependencia respecto a la pendiente de corriente, es decir, conforme se avanza aguas abajo la pendiente tiende a encontrarse totalmente horizontal, por lo que las descargas del material en el lecho tienden al mismo valor.

### Cambios en los canales del río

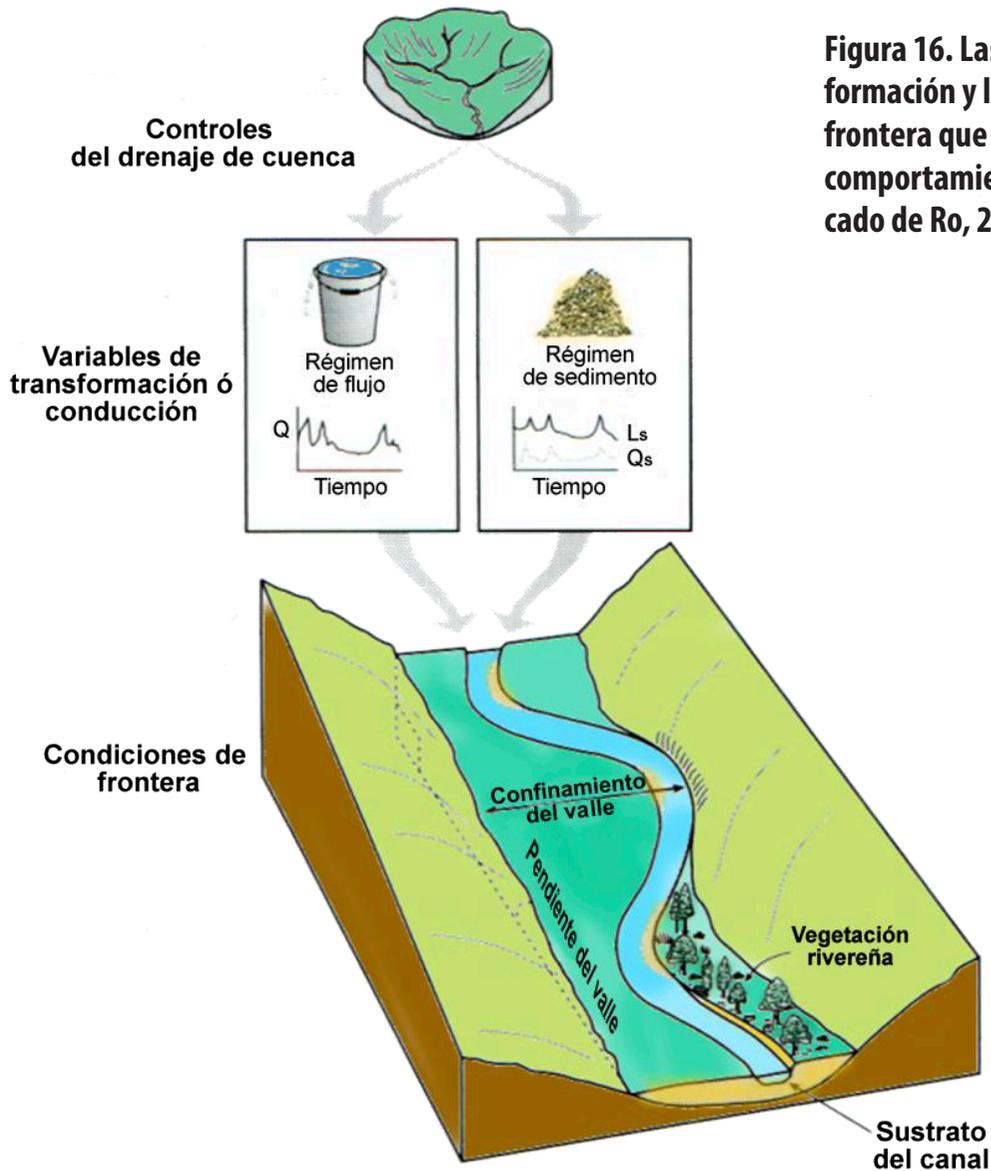
Wolman y Leopold (1957) encontraron que mientras las corrientes aluviales muestran una continua tendencia a migrar lateralmente sobre un período de años, en algunos casos los canales de corriente mantienen razonablemente estable su posición y sufren un pequeño movimiento lateral en un período considerablemente largo. Este movimiento lateral puede ser continuo o discontinuo; y entre más grande sean las corrientes que sufren este tipo de movimiento, mayor serán las tasas de migración, cuyas unidades son de distancia sobre tiempo; el fenómeno se explica debido a las variaciones en la carga de sedimentos transportada por el río, generalmente mayores en ríos largos. Y también se encontró que la cantidad de cambio es controlado por las restricciones de espacio o puntos de control sobre el cauce del río.

La sinuosidad de un sistema fluvial existe en función de la pendiente y la descarga. Para pendientes suaves el canal generalmente es recto, cuando la pendiente excede un valor límite el canal comienza a torcerse, es decir, comienza a formar meandros e incrementa su sinuosidad. Esto no es siempre así, ya que existe un valor límite para los meandros, después del cual, el canal pierde su sinuosidad y comienza a enderezarse y formar trenzas (Garde, 2006).

### Controles de forma y ajuste del canal

Todo sistema fluvial posee fluctuaciones en las variables que lo configuran a través del tiempo; de las cuales, i) las fluctuaciones del flujo y ii) la carga de

## Capítulo 4



**Figura 16.** Las variables de transformación y las condiciones de frontera que controlan la forma y comportamiento del canal. (Modificado de Ro, 2008).

sedimentos parecieran ser las más recurrentes, lo cual se traduce en ajustes permanentes que toman lugar a través de procesos de degradación, retrabajo y depósito de sedimentos. A este par de variables se les llama variables de transformación o conducción, ya que estas conducen los procesos de transformación (Figura 16).

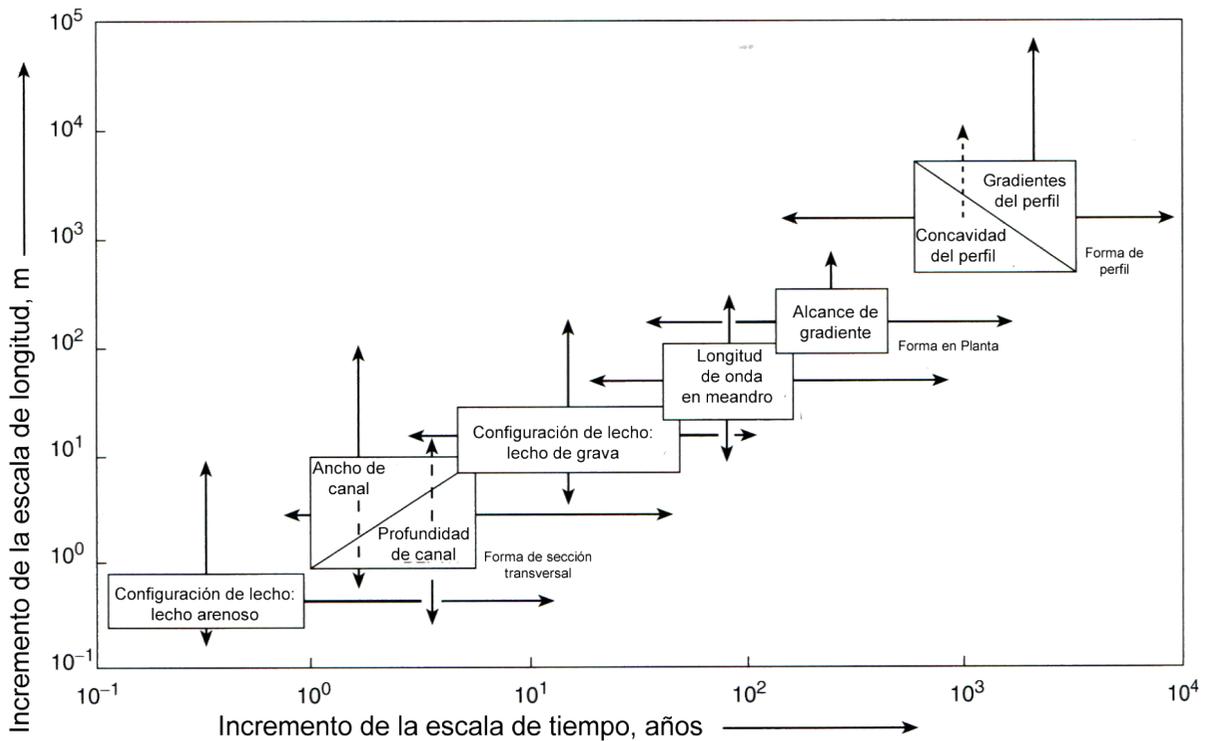
Es importante reconocer que todo el contexto de un sistema impone sobre sí límites y/o condiciones de alcance local. Generalmente estos límites se aso-

cian con la disponibilidad de la energía, ya que los ajustes en el canal se limitan a la magnitud de los gradientes que existen o pueden ser creados en el sistema fluvial, en especial al tratarse de corrientes con bancos cohesivos o que están protegidos por la vegetación. Por otra parte, al conjunto de restricciones se les denomina condiciones de frontera y se incluyen en el mismo confinamiento del valle, sustrato del canal, pendiente del valle y a la vegetación.

No todos los canales se encuentran en equilibrio,

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Figura 17. Diagrama esquemático de la escala de tiempo para el ajuste de varios componentes de forma del canal con las dimensiones de longitud dadas en una cuenca hipotética de tamaño intermedio. (modificado de Knighton, 1998).**



aunque debe entenderse el término de equilibrio más bien como un estado estacionario, en el cual la tasa de creación es igual a la de destrucción. En la naturaleza existen varios canales en desequilibrio o en un estado no estacionario. Lo cual significa que el canal puede estar respondiendo a términos de reajustes, como resultado de cambios antiguos tanto en su flujo como en el régimen de sedimentos.

Los distintos componentes de la morfología del canal cambian a velocidades distintas o a escalas temporales diferentes (Figura 17). Esto sucede así ya que existen componentes que son más sensibles que otros, y por tanto unos se ajustan más rápido que otros. Morfológicamente los ajustes poseen un

retraso después de que han experimentado algún cambio o estímulo.

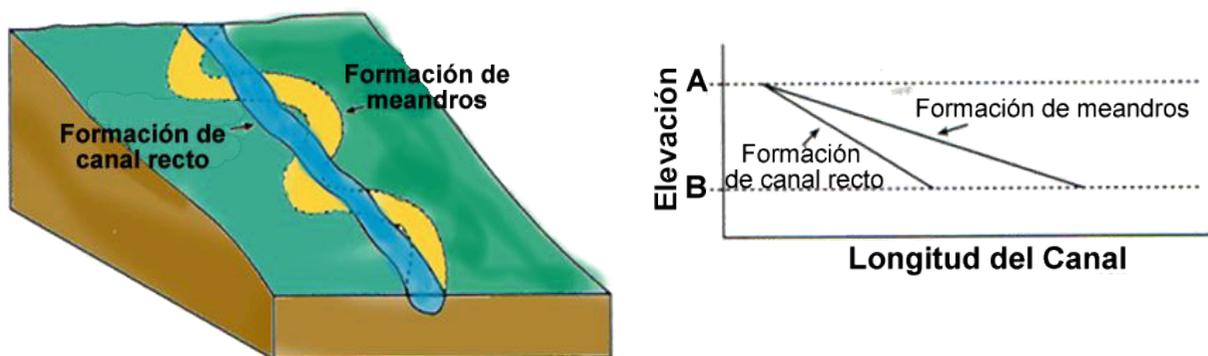
## Mecanismo del cambio

Se considera que todo sistema fluvial que presenta cambios, posee cuatro grados de libertad o variables que pueden ser modificados, estos son: la sección trasversal del canal, la pendiente, la forma de planta y la rugosidad del lecho.

Las modificaciones en la forma y tamaño de la sección trasversal se asocian a los cambios en la profundidad y anchura del canal a causa de los procesos erosivos en los bancos del canal y los procesos de incisión en el lecho o depósito. La pendiente del

## Capítulo 4

**Figura 18. Desarrollo de meandros entre los puntos A y B, y formación de canal recto con una reducción en la pendiente del canal entre los puntos A y B. (modificado de Ro, 2008).**



canal puede ser modificada en distintas formas, por ejemplo una retroalimentación negativa reduce la pendiente en secciones abruptas por medio de procesos erosivos e incrementa en partes la pendiente por medio del depósito de sedimentos. Los incrementos o disminuciones en la longitud del canal también afectan la pendiente del canal, tal y como se ilustra en la Figura 18. La forma de planta se modifica en función de la energía disponible, por ejemplo, un periodo de baja energía puede crear unidades geomorfológicas en el ensamblado que indiquen depósito o un periodo de lluvias extraordinario puede borrar todo registro anterior. Por su parte la rugosidad del lecho ofrece una contra parte de la energía disponible ya que esta ofrece oposición al tránsito del río, haciendo que la energía de este disminuya en las áreas que entran en contacto, por eso se sabe que en la parte media del canal el flujo posee mayor velocidad.

Los cambios en las secciones transversales del río, ya sean abruptos o graduales, son resultado de las variables hidrológicas, hidráulicas (energía cinéti-

ca) y del propio transporte del material. Con estas variables el sistema fluvial emplea dos grados de libertad. Generalmente son estos grados de libertad los que el sistema fluvial trata de equilibrar cuando una presión modifica el equilibrio anterior del sistema. Por tanto es importante pensar en los sistemas fluviales como sistemas dinámicos y bifásicos, compuestos esencialmente de agua y sedimento (procedente del cauce principal o de las corrientes que componen la cuenca).

### Metodología para evaluar la sustentabilidad del sistema fluvial Las Cruces

Un índice de geoindicadores es un sistema coherente de procedimientos integrados a escalas particulares; en nuestro caso la escala de cuenca es suficiente ya que todas las características geomorfológicas son consideradas y explican el comportamiento del sistema fluvial, así como los vínculos que en ella existen. Además, provee una base física con la capacidad de describir y explicar la distribución, los

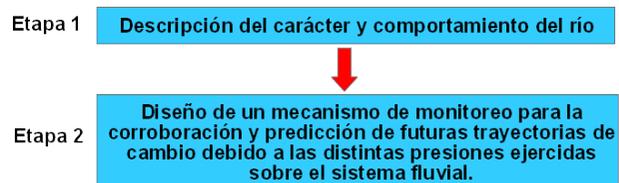
## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

procesos y formas que se crean o evolucionan en el sistema fluvial, así como la capacidad de predecir el comportamiento del sistema durante distintos períodos de su vida.

El índice aporta recursos suficientes para describir tanto el carácter como el comportamiento del sistema a lo largo de la cuenca, proveyendo una base geomorfológica para evaluar por qué el sistema tiene determinada forma y cómo evoluciona con el tiempo. El índice de geoindicadores posee una base jerárquica anidada (conjunto de geoformas o ensamble), que se estructura en distintas escalas y que van de mayor a menor como: cuenca, unidades de terreno, unidades geomorfológicas y unidades hidráulicas.

- ▼ **Escala de cuenca:** establece el tipo y configuración de las unidades de terreno dentro de la divisoria.
- ▼ **Escala de unidades del terreno:** controlan el rango y alcance de las unidades formadas a lo largo de los cursos de las distintas corrientes.
- ▼ **Escala de unidades geomorfológicas:** Se refiere a las formas de los ríos y a los procesos que las esculpen, se interpretan empleando la construcción de bloques, los cuales proveen de una base para evaluar el comportamiento del río en sus distintas etapas, mediante el análisis de su capacidad y las formas que se asocian a los distintos niveles energéticos o madurez.

**Figura 19. Etapas para la conformación de un índice de geoindicadores.**

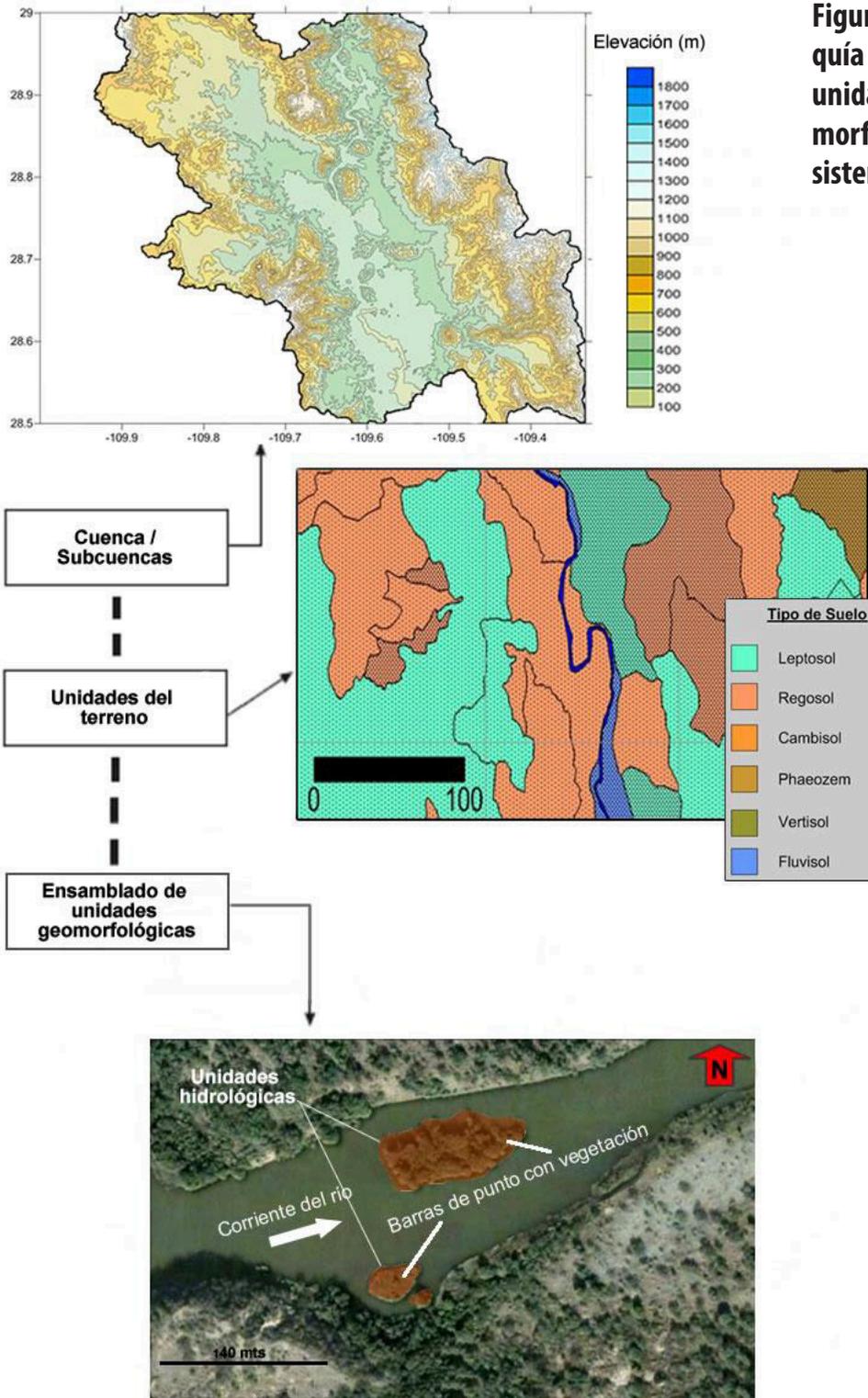


- ▼ **Escala de unidades hidráulicas:** comprenden áreas físicas de substratos homogéneos, así como el flujo de geoformas anidadas a través de distintas unidades geomorfológicas con origen similar.

El sistema de geoindicadores no es únicamente un resumen cuantitativo del carácter del río, su comportamiento, condición, respuesta frente a distintas presiones y su evolución, ya que este provee de principios guía con la finalidad de evaluar las distintas piezas que componen el sistema fluvial de forma cuantitativa y cualitativa. Esto permite una fase posterior para el diseño de un sistema de monitoreo secuencial, el cual escapa a los alcances de la presente metodología. La aproximación que se obtiene con la primera etapa de esta metodología es suficientemente flexible y abierta para la interpretación de posibles escenarios en el sistema fluvial.

A un conjunto de geoindicadores, se le denomina índice de geoindicadores; en esta metodología el índice está compuesto por dos etapas (Figura 19), en la primera etapa se identifican, interpretan y elaboran los mapas con las unidades geomorfológicas del río en la cuenca.

## Capítulo 4



**Figura 20. Jerarquía anidada de las unidades geomorfológicas del sistema fluvial.**

### **Etapas 1: Inspección del carácter y comportamiento del río**

En esta etapa se evalúa el carácter y comportamiento del río por medio del estudio de la anidación je-

rárquica asociada al sistema fluvial (Figura 20). La evaluación del carácter y el comportamiento del río, contemplan el contexto como todo aquel fenómeno que sucede dentro de sus límites, así como

**Figura 21. Etapa 1 de la evaluación de las unidades geomorfológicas del sistema fluvial.**

Etapa 1		
<b>Paso 1:</b> Evaluación regional y de las variables de control en la cuenca.	<b>Paso 2:</b> Definición y mapeo de las unidades geomorfológicas y la metodología propuesta para la estimación de la erosión en cuencas hidrológicas.	<b>Paso 3:</b> Análisis de la evolución del sistema fluvial mediante sensoría remota.

de las condiciones en las unidades del terreno a distintas escalas, siempre y cuando estén anidadas dentro de la escala de cuenca. Esta primera etapa está conformada por tres pasos, como se presenta en la Figura 21.

### Etapa 1, paso 1: análisis del escenario regional y de cuenca

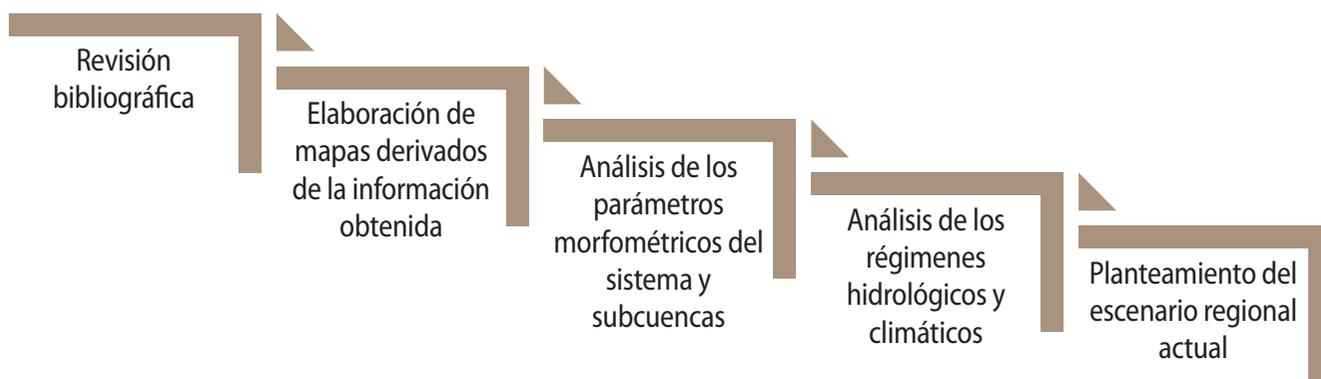
El diagrama de flujo de la Figura 22 explica los pasos que integran el paso 1 de la etapa 1 de la metodología. El desarrollo de estos pasos se emplea para evaluar a una escala de cuenca las condiciones límite y sus controles con los cuales el sistema fluvial opera. Con estos pasos prácticamente se establece el estado del sistema fluvial.

### Elaboración de mapas preliminares

Cada unidad del sistema está integrada por el terreno y diversos factores ambientales, los cuales deben ser suficientemente consistentes para mostrar el arreglo de las características y de los procesos que les dan origen. La identificación y mapeo de estas características y procesos se toma como base para describir el carácter fisiográfico, posición del terreno, geología y relieve (Tabla 7), con la finalidad de dotar de significado a los datos que se generan durante todos los pasos que integran la metodología propuesta.

La elevación, la pendiente longitudinal del valle y el área por altura aportada (curva hipsométrica) son

**Figura 22. Etapa 1, paso 1: procedimiento utilizado para producir un escenario regional.**



## Capítulo 4

**Tabla 7. Parámetros utilizados para identificar las unidades del terreno.**

Identificación de características	Significado
Carácter fisiográfico o morfología del terreno	Las características de los patrones de las formas del terreno, los cuales se asocian a controles evolutivos de la cuenca en periodos largos, como son los aspectos tectónicos, estructurales, geológicos, litológicos, ajustes del nivel del mar, condiciones climáticas e hidrológicas, los cuales dictan el carácter de la configuración del valle en los cuales operan los estilos del sistema fluvial.
Posición del terreno	Se refiere al proceso que controla la distribución en la zona e identifica las características de los patrones en las subcuencas y la distribución espacial de las geoformas (estilos) en ellos.
Geología	Identifica los controles geológicos en la morfología del terreno y carácter y comportamiento del río, los cuales se manifiestan a través de los controles estructurales y litológicos. Los controles estructurales dictan la geometría y configuración del valle, inducidos por patrones de plegamiento, fallamiento, etc., y los factores asociados para determinar el grado y patrones de disección del terreno. Los controles litológicos determinan la viabilidad y calibre del material, determinado en parte por los regímenes de intemperismo. Estos factores no solo influyen la estructura del río, sino que también afectan su capacidad de ajuste.
Relieve	Las diferencias en el relieve proveen un indicativo del grado en el cual el terreno ha evolucionado. Lo cual afecta a la disponibilidad del sedimento y agua en el sistema ribereño.

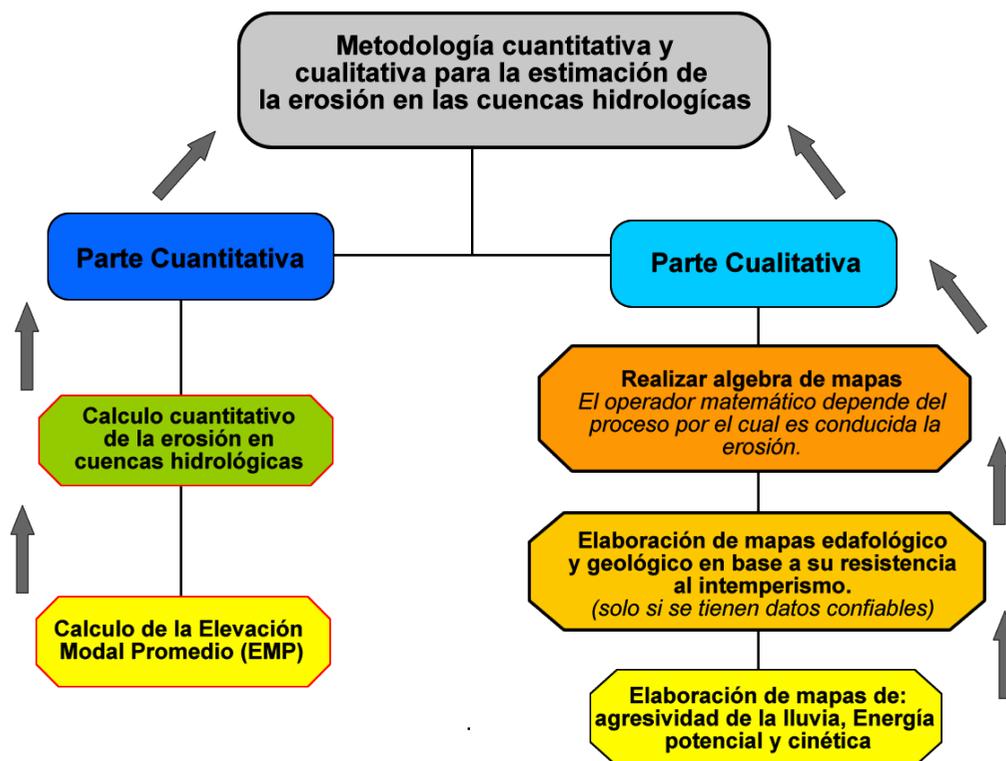
empleados con el fin de describir el nivel de madurez del terreno (Tabla 8). Estos descriptores representan los controles fundamentales en el carácter del río y su comportamiento. En varias instancias, los límites de las unidades del terreno son enmar-

cados por rasgos distintivos en las pendientes a lo largo de los perfiles longitudinales, los cuales indican los cambios aguas abajo en la anchura del valle y su elevación, lo que resulta en una transición en el ensamble de las unidades geomorfológicas.

**Tabla 8. Descriptores utilizados para caracterizar las unidades del terreno.**

Descriptores de las unidades del terreno	Significado
Elevación	La elevación puede ser empleada como un descriptor para explicar la posición del terreno, ya que esta propiedad es un control primario en las condiciones y patrones climáticos. También debe ser tomado en cuenta que la elevación puede ser una variable importante para cada unidad de terreno.
Pendiente del valle	La pendiente es un control primario en la naturaleza y tasas de los procesos geomorfológicos, ya sea en términos del movimiento del agua y/o de los sedimentos en las pendientes, sobre el valle, o entre las conexiones de estas. La pendiente del perfil longitudinal, es uno de los controles clave en el carácter y comportamiento del río en cada unidad del terreno.
Área por altura aportada	Los cambios significativos en la energía disponible, comúnmente definen los límites entre las unidades del terreno. Este es un control significativo en el carácter y comportamiento de cada estilo del río encontrado por unidad de terreno.

Figura 23 Diagrama de flujo de la metodología propuesta para la estimación de la erosión en cuencas hidrológicas. La dirección de las flechas indica el flujo normal del proceso.



## Análisis de los parámetros morfométricos de la cuenca

Entre estos parámetros se incluyen: los patrones de drenaje, la densidad del drenaje, la forma de la cuenca, potencia de corriente, etc. Estos parámetros sirven únicamente para resaltar las diferencias entre las cuencas o partes dentro de esta (subcuencas). Estos se emplean únicamente con fines de interpretación, aunque en esta metodología solo se describan, no se emplean para señalar la magnitud ni dirección del cambio, ya que uno de los objetivos de esta metodología es evitar la subjetividad del criterio humano; sin embargo sí se emplea para aportar causas o para saber cómo las presiones ejercidas en el sistema impactarán la evolución natural del sistema.

## Presentación de los rasgos regionales

En la actualidad varias zonas de la República Mexicana se encuentran estudiadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), institución que posee excelentes estudios de los cuales se puede recuperar una gran gama de información, entre las anteriormente enlistadas<sup>(6)</sup>. La finalidad de los puntos anteriores, sirven no solo como punto de referencia y partida, sino que son herramientas útiles a la hora de interpretar y crear modelos de la evolución del sistema fluvial y evaluar la sustentabilidad de este, e incluso en el diseño de la etapa posterior referente al monitoreo de nuestros indicadores.

En este apartado se incluyen todas las presiones y actividades antropogénicas que pudieran impactar

<sup>(6)</sup> Esta serie de estudios se integran en Los Informes Técnicos para cartas geológico-mineras a escalas 1:250,00 y 1:50,000

o no el sistema, ya que para evaluar correctamente el sistema para medir su grado de sustentabilidad, se debe contemplar los aspectos económicos, ambientales y sociales que integran el sistema, por lo menos en su mínima expresión que es su identificación. El proceso se presenta de forma sistemática según el diagrama de flujo presentado en la Figura 23.

### **Procedimiento para identificar e interpretar las unidades geomorfológicas ensambladas en el río, mediante sensoría remota**

Los análisis del carácter, distribución e historia de las unidades geomorfológicas a través del río, proveen claves para explicar el comportamiento de las unidades geomorfológicas, mismas que deben ser evaluadas en términos de su forma y medida, lo cual puede ser realizado mediante el análisis de imágenes de distintas fechas. Es importante considerar la resolución de las imágenes, ya que entre mayor sea esta, mayor sensibilidad se puede adquirir y por tanto indicar mejor los cambios que sufre el sistema.

Se emplea la técnica de clasificación libre en el *software* IDRISI; la herramienta que realiza esta clasificación utiliza los picos del histograma (son los valores del pixel con la mayor frecuencia) con los valores de los pixeles por cada banda que comprende el paquete de imagen *Landsat* empleada. Debido a que esta técnica posee criterios específicos para la identificación de los picos en los histogramas, no se tiene que hacer estimaciones previas (como se ne-

cesita en algunas otras técnicas) sobre el número de grupos que una imagen contiene, ya que esta herramienta no solo lleva a cabo la operación sino regresa el número de clusters encontrados y el porcentaje que estos ocupan en el área estudiada.

La finalidad de este proceso es la clasificación de las firmas encontradas en la combinación de las bandas que componen el paquete de imagen *Landsat* para determinadas fechas, a la vez que se obtiene una cantidad de información rápida y acertada sobre la ubicación de estas en el área de estudio.

Se emplea la técnica de límites de dispersión, con el cual se establecen los límites inferior y superior respecto de la variación normal, más allá de la cual podemos considerar un cambio verdadero al ocurrido en nuestras imágenes. Las imágenes recomendadas para este tipo de análisis deben ser tratadas con un clasificador tipo brand, con un *cluster* para 30 clases.

Para evaluar la probabilidad de que ciertas diferencias existan en el mundo real, se pueden medir las características de la dispersión de los valores alejados a la media. Por tanto, la media y la desviación estándar son utilizadas para aislar cambios inusuales. Para crear los límites de dispersión, se toma en cuenta la media y se le sustrae tres veces el valor de la desviación estándar, obteniendo como resultado el límite inferior (LI). Por otra parte, al sumar tres veces la desviación estándar obtenemos el límite superior (LS). Por medio de este procedimiento, aislamos los valores más inusuales, los cuales indican los cambios significativos del sistema.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

$$LI = \text{Media} - 3\sigma$$
$$LS = \text{Media} + 3\sigma$$

Debido a la naturaleza de las imágenes empleadas para su estudio (muy poca resolución), se ha modificado la fórmula para acentuar los cambios, modificando los límites inferior y superior como sigue:

$$LI = \text{Media} - 2.5\sigma$$
$$LS = \text{Media} + 2.5\sigma$$

Se realiza una reclasificación de los valores, asignando el valor de 1 para los valores menores que LI, 0 a los valores entre LI y LS, y finalmente el valor de 2 a los valores mayores que LS. Con esta reclasificación se produce un mapa, ubicando los cambios según su clasificación en los límites de cambio superior e inferior.

## Planteamiento del monitoreo - La implicación de la presión ocasionada por una presa

El estudio de las interacciones de la metamorfosis en los sistemas fluviales y de la heterogeneidad espacio-temporal de la dinámica de los canales y sus componentes ecológicos, sigue sin madurar lo suficiente en el entendimiento de sistemas vírgenes, como para incluirlo en un sistema de geoindicadores que pretende explicar los mecanismos del cambio, con la finalidad de asegurar la sustentabilidad de un sistema natural impactado por el hombre.

Los cambios presentados aguas abajo de las presas, son muy complejos, tanto en parámetros espaciales como temporales, ya que es difícil asegurar cuánto durará su período de relajación frente

a los estímulos o presiones que sean introducidas al sistema. Como se ha visto, estos períodos de ajuste pueden tomar décadas o incluso milenios. Además, debemos considerar el papel que juega la vegetación ribereña en el desarrollo y control del canal, lo cual debe ser determinado, ya que sin este conocimiento la predicción de las tasas y dirección de los cambios en el canal permanecerán siendo una interrogante.

Los cambios en la forma del canal no son una entidad distinta a las respuestas o manifestaciones ecológicas de la biota del sistema fluvial que se esté estudiando, por lo que deben ser consideradas a la hora de establecer los parámetros que darán origen o por lo menos configurarían la sensibilidad de los geoindicadores. Por ejemplo, la operación de presas y los patrones en el uso de suelo juntos influyen tanto espacial como temporalmente a cambios en la morfología del sistema fluvial y sus componentes bióticos, alterando sus regímenes de temperatura, flujo, nutrientes, etc., de lo cual induce al sistema a una alteración en el transporte y distribución normal de su energía, lo cual se traduce en numerosas implicaciones biológicas (Lessard y Hayes, 2003; Ligon *et al.*, 1995; Collier *et al.*, 1996), mismas que escapan a los propósitos de este trabajo.

La mejor forma de explicar el impacto de una presa sobre un río es como lo expresaron Collier *et al.*, 1996:

***“El río que emerge de una presa no es el mismo río que entró en el reservorio”.***

### Conclusiones y recomendaciones

La carga suspendida depende de la energía del agua, por lo que está condicionada totalmente a que exista un flujo suficientemente potente para trasladar los sedimentos a través del sistema, sin embargo la carga disuelta aumenta su capacidad de transporte, debido a que aumenta su densidad específica y por tanto su capacidad para transportar tamaños de partículas de gran tamaño. Este fenómeno explica el acarreo de grandes bloques, el cual debiera considerarse para transformaciones en eventos extraordinarios y/o el registro de la frecuencia de ajuste del sistema. Se recomienda la creación de un índice o evaluación de la eficiencia y cinética de los procesos de intemperismo que suceden en los distintos componentes de un sistema fluvial, considerando la litología y edafología del sitio o por lo menos la caracterización del “eslabón” más débil del sistema o el que más sedimentos pueda aportar. Es decir, crear un índice de vulnerabilidad para las rocas y suelos que conforman los sitios que se estudien.

La dinámica temporal de las precipitaciones y las variaciones de erosión pueden ser utilizadas como un geoindicador de la degradación ambiental. Pero cuando la erosión a causa de la lluvia decrece, la intensidad de erosión se comporta de forma muy similar; sin embargo, esto no quiere decir que la erosión se detenga: simplemente actúa más lentamente, lo suficiente como para no ser detectada por la escala temporal utilizada comúnmente por los geoindicadores. El empleo de referencias más sensibles como bioindicadores, pudiera solucionar el inconveniente

de cambios muy rápidos. Otra alternativa sería la medición de la carga transportada por el río *in situ*.

La reducción del flujo de corriente es un cambio típico en un sistema fluvial, asociado a la construcción de una presa. La estabilización de los altos flujos en las estaciones climáticas particulares modifica el contenido de las corrientes tributarias y cuencas, las cuales poseen una mayor carga de sedimentos disueltos y transportados si se habla de lluvias de alta energía. Sin embargo, estas pueden ser diluidas con el agua del cauce principal, el cual transporta el agua que sale de la presa, con lo cual se altera por la eliminación los disturbios estacionales, por lo que habría de agregarse un indicador para conocer cuándo el fenómeno de cambio será controlado por la deficiencia o disponibilidad de transporte de sedimentos en la corriente principal. Los cambios pequeños que suceden en el sistema aportan información, pero no poseen la capacidad de reconfigurar el sistema, por lo que el índice del sistema fluvial debe ser lo suficientemente flexible para medir y explicar estos fenómenos y las consecuencias que trae para el sistema y su entorno. Con la metodología propuesta puede alcanzarse esto, siempre y cuando se manejen imágenes satelitales de mayor resolución para los sitios susceptibles a los procesos erosivos o en sitios de interés social y económico que anteriormente fueron localizados con imágenes de menor resolución.

Para iniciar con la segunda etapa de la metodología planteada, se debe delimitar el sistema considerando el canal de mayor orden (donde se establezca la presa) como el sistema de estudio y delimitar la cuenca o sistema fluvial a analizar como el entorno

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

de este. Considerar la cuenca como sistema supone conocer un área mucho mayor al propio sistema y con un grado mayor de dificultad, sin mencionar que esto conlleva un aumento en los costos de la monitorización de este tipo de modelo.

Se recomienda que el estudio de la distribución espacial de los elementos químicos se vincule con la geología e hidrología, así como con todos aquellos factores que se presuman afecten al sistema de estudio sobre un Sistema de Información Geográfica (SIG) e imágenes satelitales. Se recomienda incluir aspectos o consideraciones del transporte de los contaminantes, el depósito y removilización de los sedimentos contaminados, particularmente en un escenario de cambio climático.

Se sugiere complementar la metodología propuesta incluyendo:

- ▼ **El empleo de isótopos radiogénicos de semiperiodo de decaimiento corto** para rastrear la movilidad y velocidad de los sedimentos en el sistema.
- ▼ **Sensoría remota** para evaluar el cambio y patrones de planta del sistema con imágenes de mayor resolución y más bandas.
- ▼ **El empleo de modelos numéricos de dispersión de sedimentos asociados a metales**, los cuales proveen de bases para la implementación de respuestas ante las presiones, sea su origen natural o antropogénico.

Se han utilizado análisis geoquímicos de sedimentos para estudiar el impacto de la contaminación en corrientes (Vincent *et al.*, 1999; Hudson-Edwards and Taylor, 2003; Box *et al.*, 2005), permaneciendo hasta hoy como técnicas fundamentales para tal fin, sin embargo, existen detalles que van más allá de lo que un análisis geoquímico podría aportar, por lo que se sugiere fusionar a este “paso”, el empleo de las imágenes satelitales por medio del estudio de las firmas espectrales de las mismas, ya que por medio de ellas se puede realizar la determinación de la afectación del suelo por distintas sales o partículas asociadas al contaminante. También se pueden encontrar relaciones de afectación en el desarrollo de la vegetación y uso de suelo, entre otros fenómenos, que permitan el análisis de todos los parámetros relacionados con la calidad o salud de nuestro sistema, siempre y cuando la resolución de las imágenes lo permitan.

Solo los elementos que impacten el sistema fluvial y se asocien a los sedimentos en él transportados, pueden ser empleados como geoindicadores, ya que el elemento geomorfológico de mayor impacto como geoindicador se refiere a las tasas de depósito y movilización de los sedimentos en los sistemas fluviales, en especial a aquellos que se depositan en las márgenes del canal de mayor orden. Aunque en este trabajo no se desarrolló este geoindicador, su implementación puede ser llevada a cabo a partir de imágenes satelitales con una mayor cantidad de bandas y resolución, así como la creación de una base de datos de firmas espectrales para los distintos tipos de suelo y roca que componen el área de estudio.

## Capítulo 4

Los modelos basados en la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE), simplifican bastante la unidad que estudia debido al manejo de unas cuantas variables que dependen en mayor parte de los controles topográficos del terreno y de la administración del uso de suelo. Las versiones posteriores han agregado una cantidad mayor de tipos de cubiertas de suelo (Renard *et al.*, 1997). Sin embargo en este trabajo se encontró que la metodología que emplean los modelos basados en USLE no poseen la capacidad de adaptarse a escalas de cuenca. Por otra parte, el tipo de suelo de la cuenca media del río Yaqui no permite el desarrollo de la agricultura, por lo que resultaría improductivo un análisis basado en las ecuaciones USLE. Otras desventajas de estos modelos en el contexto mexicano son:

- ▼ La carencia de datos históricos para su aplicación, por lo que gran parte de sus variables deben ser suplidas mediante otras ecuaciones o suposiciones.
- ▼ Los modelos USLE están orientados a suelos que poseen pendientes suaves.

La falta de datos de precipitación (entradas) y flujos de corriente (salidas), dificulta la tarea de elaborar, modelar y comprobar los balances de masa para los sistemas fluviales. Por lo que se recomienda suplir esta necesidad, en especial antes de ejecutar la etapa 2 que propone esta metodología, que corresponde a la administración de los recursos naturales que son soportados por el sistema fluvial.

El estudio del cauce principal o de mayor grado es suficiente para entender el comportamiento del resto del sistema, ya que si se sostiene la hipótesis de la herencia de la configuración del sistema de un estado anterior  $t_n$ , este canal es el producto de los cambios en todos los tributarios y cuencas. El diseño y planeación de obras hidráulicas están siempre relacionados con eventos hidrológicos futuros. Por tanto, se recomienda el empleo de métodos probabilísticos y estadísticos para caracterizar el sistema, con especial énfasis durante la segunda etapa de la metodología propuesta.

Los cambios energéticos o de las variables que las describen son por tanto geoindicadores esenciales por su misma naturaleza y por ser el motor de cualquier fenómeno que se desarrolle en el sistema fluvial. Sin embargo, la aplicación de los mismos precisa el empleo de estaciones puntuales y físicas sobre el terreno. Para este objetivo se propone la metodología de Lane (1955), la cual propone una metodología cualitativa para conocer el estado actual de una corriente, si se encuentra erosionando o depositando su carga en el cauce. Esta metodología toma en cuenta cuatro variables, que son:

- ▼ Caudal (Q)
- ▼ Caudal del sólido (L)
- ▼ Pendiente del canal (S)
- ▼ Diámetro del material del lecho (D)

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Estas variables son virtualmente pesadas en una báscula. Si la balanza se inclina hacia la derecha, indica un exceso del caudal (Q) y de su pendiente (S), lo cual indica que la corriente o el río se encuentran en un proceso erosivo para encontrar el equilibrio entre los brazos de la balanza. Por el contrario, si se encuentra en exceso el caudal de sólidos (L), el río se encuentra en un proceso de depósito, con lo cual ocurrirá un ascenso del lecho, debido al depósito de la carga de la corriente. Esta metodología es muy útil para analizar el estado de equilibrio o desequilibrio de una corriente, en especial cuando se tiene un impacto antropogénico sobre estos. Además, proporciona un geoindicador para cambios muy rápidos, incluso podría ser más eficiente que el empleo de bioindicadores.

El carácter y comportamiento del río no reflejan su variabilidad a través de un modelo continuo. En vez de esto, se puede considerar al sistema fluvial como “continuo multivariable” asociado a un complejo de asociaciones infinitas. Por tanto, una conclusión plausible pareciera ser que no hay un índice universal para un sistema fluvial, por lo que es necesario seguir investigando, observando e incorporando todos los adelantos y metodologías que parecieran dar mayor información sobre los cambios que se producen en los sistemas fluviales. No hay que olvidar que el estudio de un sistema fluvial se hace de forma holística y mediante la dinámica de sistemas, corroborando la metodología por medio de experimentos llevadas a cabo en el campo. Se debe dar prioridad a sitios donde el monitoreo muestre evidencias de erosión y depósito, y que además estos sitios permitan la

extrapolación a escala de área mayores, debido a que la erosión ocurre en la mayor parte de una cuenca o sistema fluvial, pero su producto (sedimento) se concentra localmente. Por tanto el almacenamiento del sedimento es más fácil de detectar y ser monitorizado. Se concluye que el proceso de depósito es mucho más eficiente como geoindicador que la erosión *per se*, ya que este es detectado con mayor facilidad por la sensoría remota e imágenes aéreas.

La importancia de este trabajo en relación a los indicadores que maneja Semarnat recae en la consideración del aspecto geológico y ambiental como primera instancia; presenta indicadores basados en el sistema natural como punto de partida y no en el hombre o sus actividades como base fundamental del indicador. Por otra parte, este tipo de metodología permite la aplicación de un índice orientado a los sistemas fluviales, lo que facilita la administración de los recursos que los conforman y permite plantear distintos escenarios frente a presiones que pudieran tener un origen en la planeación y desarrollo de una obra civil de gran tamaño, cambios de uso de suelo, etc., o en presiones naturales como el cambio climático y/o eventos extraordinarios. Pero sin duda, la principal aportación de esta metodología es la objetividad para plantear el estado del sistema fluvial sin la necesidad de clasificar o evaluar la representatividad de las variables que configuran el sistema, como sucede con los métodos que se emplean en la mayoría de las instituciones y/o por los tomadores de decisiones, lo cual influye en los resultados obtenidos, quizás en un índice inadecuado para la administración sustentable del sistema fluvial a estudiar.

## Capítulo 4

### Referencias

- Adams W.J., Kimberle R.A., Barnett J.W., 1992** – Sediment quality and aquatic life assessment, Environmental Science and Technology 26(10): 1865 - 1875.
- Adriaanse A., 1993** – Environmental Policy Performance Indicators: Nature Indicators Survey, Denmark: Ministry of Environment and Energy. 66 p.
- Anderson R.S., and Anderson S.P., 2010** – Geomorphology: The mechanics and chemistry of landscapes, Cambridge University Press, P.654.
- Baffaut C., Nearing M.A., Nicks A.D., 1996** – Impact of CLIGEN parameters on WEPP-predicted average annual soil loss, Transactions of the ASAE 39(2): 447-457.
- Bell, Simon y Stephen M., 1999** – Sustainability Indicators, Measuring the immeasurable, Earth scan Publishing, P.241.
- Berger A.R. y Iams W.J., 1996** – Geoindicators: Assessing rapid environmental changes in earth systems, A.A. Balkema, P.477..
- Bermejo R., 2002** – Los sistemas de indicadores como reflejo de las diversas concepciones de la sostenibilidad, Indicadores ambientales, situación actual y perspectivas. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, pp.35-73.
- Bogen J. 2006** – Sediment transport rates of major floods in glacial and non-glacial rivers in Norway in the present and future climate, Sediment dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems (Proceedings of a symposium held in Dundee, UK, July) IAHS 306: 148-158.
- Box S.E., Bookstrom A.A., Ikramuddin A., 2005** – Stream-sediment geochemistry in mining-impacted streams: Sediment mobilized by floods in the Coeur d'Alene-Spokane river system, Idaho and Washington: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report SIR 2005-5011.
- Bunn S.E., Arthington A.H., 2002** – Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity, Environmental Management 30(4): 492-507.
- Chevalier S.R., Chiniere R., and Bernier L., 1992** – Sharing nature's interest: Ecological footprints as an indicator of sustainability, Earthscan Publications Ltd., P.206.
- Christophoridis C., Fytianos K., 2006** – Conditions affecting the release of phosphorus from lake sediments, Journal Environmental Quality 35(4):1181-1192.
- Collier M., Webb R.H., Schmidt J.C., 1996** – Dams and Rivers: Primer on the Downstream Effects of Dams, U.S. Geological Survey, Denver, CO. Circular 1126, P.92.
- Dennis I.A., Macklin M.G., Coulthard T.J., Brewer P.A., 2003** – The impact of the October-November 2000 floods on contaminant metal dispersal in the Swale catchment, North Yorkshire, UK, Hydrological Processes 17(8):1641-1657.
- Dotterweich M., 2008** – The history of soil erosion and fluvial deposits in small catchments of central Europe: Deciphering the long-term interaction between humans and the environment, Geomorphology 101(1-2):192-208.

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

- Ekwue E.I., 1990** – Effect of organic matter on splash detachment and the processes involved, *Earth Surface Processes and Landforms* 15(2):175-181.
- Elwell H.A., 1980** – Design of safe rotational systems. Department of Conservation and Extension, Harare, Zimbabwe, P.50.
- Evans R., 1980** – Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: an empirical viewpoint, *Soil erosion*, chapter 4, Wiley and sons Ltd., p. 109-128.
- Ferrier G., 1999** – Application of imaging spectrometer data in identifying environmental pollution caused by mining at Rodaquilar, Spain, *Remote Sensing of Environment* 68(2):125-137.
- Galay V.J., 1983** – Causes of River Bed Degradation, *Water Resources Research* 19(5):1057-1090.
- Garde R.J., 2006** – *River Morphology*, New Age International, 1a ed., P.502.
- Gordon W.S., Famiglietti J.S., 2004** – Response of the water balance to climate change in the United States over the 20th and 21st centuries: results from the VEMAP Phase 2 model intercomparisons, *Global Biogeochemical Cycles* 18, GB1030, P.16.
- Graf W.L., 1999** – Dam nation: a geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts, *Water Resources Research* 35(4):1305-1311.
- Gregory K.J., 1987** – *River channels, Human Activity and Environmental Processes*, Wiley and sons, p.482.
- Gregory K.J., 2006** – The human role in changing river channels, *Geomorphology* 79(3-4):172-191.
- Gurnell A.M., Petts G.E., 2002** – Island-dominated landscapes of large floodplain rivers, a European perspective, *Freshwater Biology* 47(4):581-600.
- Hack J.T., 1957** – Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland, U.S. Geological Survey Profesional Paper, 294-B, P.215.
- Hardi P. and Zdant T., 1997** – *Assessing Sustainable Development: Principles in Practice*. Report of the Conference on Sustainable Development Performance Measurement. Canada: International Institute for Sustainable Development, P.166.
- Horton R.E., 1945** – Erosional developments of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology, *Geological Association of America Bulletin* 56(3):275-370.
- Hudson-Edwads K.A., Taylor K.G., 2003** – The geochemistry of sediment-borne contaminants in fluvial, urban and estuarine environments, *Applied Geochemistry* 18(2):155-157.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática - Instituto Nacional de Ecología INEGI-INE, 2000** – *Indicadores de desarrollo sustentable en México*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, P.181, Aguascalientes, México.
- Jackson R.B., Carpenter S.R., Dahm C.N., McKnight D.M., Naiman R.J., Postel S.L., Running S.W., 2001** – Water in changing world. *Ecological Society of America, Issues in Ecology* 9, P.18.
- Knighton D.A., 1998** – *Fluvial Forms and Processes: A New Perspective*, Hodder Arnold Publication, p.400.

## Capítulo 4

- Lane E.W., 1955** – The importance of fluvial geomorphology in hydraulic engineering, *ASCE Journal of Hydrology Division* 81(745):1-17.
- Leopold L. B., 1959** – Probability analysis applied to a water-supply problem: U.S. Geol. Survey Circular 410, P.18.
- Lessard J.L., Hayes D.B., 2003** – Effects of elevated water temperature on fish and macroinvertebrate communities below small dams, *River Research and Applications* 19(7):721-732.
- Ligon F.K., Dietrich W.E., Trush W.J., 1995** – Downstream ecological effects of dams. *Biosciences*, 45(3):183- 192.
- López L.V.M., 2008** – Sustentabilidad y desarrollo sustentable: origen, precisiones conceptuales y metodología operativa, Editorial Trillas, P.220.
- Ludwing W., Probst J.L., and Kempe S., 1996** – Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion, *Global Biogeochemical Cycles* 10(1):23-41.
- Luna B.L., Wolman M.G., Miller J.P., 1964** – Fluvial processes in geomorphology, The Dover edition, P.509.
- Magilligan F.J., Nislow K. H., Graber B. E., 2003** – Scale-independent assessment of discharge reduction and riparian disconnectivity following flow regulation by dams, *Geology* 31(7):569-572.
- Magilligan F.J., Nislow K.H., 2005** – Changes in hydrologic regime by dams, *Geomorphology* 71(1-2): 61-78.
- Margalef R., 1982, Ecología, Ediciones Omega, P.451.**
- Martín J.M., Meybeck M., 1979** – Elemental mass balance of material carried by world major rivers, *Marine Chemistry* 7(3):173-206.
- Melton M.A., 1958** – Geometric properties of mature drainage systems and their representation in an E4 phase space, *Journal of Geology* 66(1):35-56.
- Merzouk A. and Blake G.R., 1991** – Indices for the estimation of interrill erodibility of Moroccan soils, *Catena* 18(6): 537-550.
- Middelkoop H., 2000** – Heavy metal pollution of the river Rhine and Meuse floodplain, *Netherlands Journal of Geosciences* 79(4):411-428.
- Ministry of Environmental Energy, 1995** – Nature indicators Surrey, Denmark: Ministry of Environmental and Energy, P.256.
- Montgomery D.R. and Brandon M.T., 2002** – Topographic controls on erosion rates in tectonically active mountain ranges: *Earth and Planetary Science Letters* 201(3-4):481-489.
- Morisawa M., 1968** – Streams: their dynamics and morphology, McGraw Hill, P.175.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 1993** – OECD core set of indicators for environmental performance reviews, A synthesis report by the group on the state of the environment, *Environment monographs* 83: OCDE/GD(93)179.
- Peizhen Z., Molnar P., Downs W.R., 2001** – Increased sedimentation rates and grain sizes  $2\pm 4$  Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates, *Nature* 410: 891-897.
- Petts G.E., 1984** – Impounded Rivers: perspectives for ecological management, Wiley and sons, P.326.
- Petts G.E. and Gurnell A.M., 2005** – Dams and geomorphology: Research progress and future directions, *Geomorphology*, 71(1):27-47.

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

- Poff N.L., Allan J.D., Palmer M.A., Hart D.D., Richter B.D., Arthington A.H., Rogers K. H., Meyer J.L., Stanford J.A., 2003** – River flows and water wars? Emerging sciences for environmental decision- making, *Frontiers Ecology Environment* 1(6):298-306.
- Poff N.L., Bledsoe B.P., Cuhacyan C.O., 2006** – Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: Geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems, *Geomorphology* 79(3-4):264-285.
- Poff N.L., Hart D.D., 2002** – How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal, *Bioscience* 52(8):659-668.
- Ramirez L., 2002** – Indicadores ambientales: Una visión general, *Indicadores ambientales-Situación actual y perspectivas*, Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, P.306.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool K.K. and Yoder D.C., 1997** – Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), *Agriculture Handbook No. 703*, USDA, Washington, DC. P.537.
- Renschler C.S., Harbor J., 2002** – Soil erosion assessment tools from point to regional scales-the role of geomorphologists in land management research and implementation, *Geomorphology* 47(2- 4):189-209.
- Renschler C.S., Mannaerts C., Diekkruger B., 1999** – Evaluating spatial and temporal variability of soil erosion risk-rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain., *Catena* 34(3-4): 209-225.
- Richter B.D., Mathews R., Harrison D.L., Wiginton R., 2003** – Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity, *Ecological Applications* 13(1):206-224.
- Ro C., 2008** – *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*, Routledge, Taylor & Francis Group, P.224.
- Rzhanitsyn N.A., 1960** – *Morphological and Hydrological Regularities of the Structure of the River Net.*, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Division, P.380.
- Sánchez P., 2002** – Indicadores ambientales urbanos y de sostenibilidad, *Indicadores ambientales-Situación actual y perspectivas*, Madrid: Ministerio de Medio ambiente, P.306.
- Schiolds F.D., Simon A., Steffen L.J., 2000** – Reservoir effects on downstream river channel migration, *Environmental Conservation*, 27(1):54-66.
- Schumm S.A., 1956** – *Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badland at Perth Amboy, New Jersey.*, *Geological Society of America Bulletin* 67(5):597-646.
- Schumm S.A., 1969** – River metamorphosis, *Proceedings, American Society of Civil Engineers, Journal of Hydraulics Division* 95:255 – 273.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Semarnat, 2007** – Programa sectorial de medio ambiente y recursos naturales 2007-2012, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- P.170, Estado de México, México DF.**
- Secretaría de Energía SENER, 2008** – Balance nacional de energía. México, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, *Dirección de Planeación Energética, Secretaría de Energía, P.138, Estado de México, México DF.*

## Capítulo 4

- Spangenberg J., 1998** – Sustainability Indicators: A compass on the Road Towards Sustainability, Wuppertal paper 81:1-30.
- Stanford J.A., Ward J.V., Liss W.J., Frissell C.A., Williams R.N., Lichatowich J.A., Coutant C.C., 1996** – A general protocol for restoration of regulated rivers, US Department of Energy Publications, Regulated Rivers: Research and Management 12:391-413.
- Stevaux J.C., Martins D.P., Meurer M., 2009** – Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil, *Geomorphology* 113(3-4):230-238.
- Strahler A. H., 1952** – Dynamic basis of geomorphology, *Geological Society of America Bulletin* 63(9):923-938.
- Strahler A.N., 1957** – Quantitative analysis of watershed geomorphology, *American Geophysics Union* 38(6):913-920.
- Summerfield M.A. and Hulton N.J., 1994** – Natural controls of fluvial denudation rates in major world drainage basins, *Journal of Geophysical Research* 99(13):871-884.
- Syvitski J.P.M., Vorosmarty C.J., Kettner A.J. and Green P., 2005** – Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean, *Science* 308(5720):376-380.
- Vincent K.R., Church S.E., Fey D.L., 1999** – Geomorphological context of metal-laden sediments in the Animas River floodplain Colorado, U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 99-4018A:99-106.
- Vitousek P.M., Aber J.D., Howarth R.W., Likens G.E., Matson P.A., Schindler D.W., Shlesinger W.H., Tilman D.G., 1997** – Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences, *Ecological Applications* 7(3):737-750.
- Voroney R.P., Van V.J.A. and Paul E.A., 1981** – Organic carbon dynamics in grassland soils, Model validation and simulation of the long-term effects of cultivation and rainfall erosion, *Canadian Journal of Soil Science* 61(6):211-224.
- Vörösmary C.J., Meybeck M., Fekete B., Sharma K., Green P. and Syvitski J.P.M., 2003** – Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments, *Global and Planetary Change* 39(1-2):169-190.
- Walling D.E., Owens P.N., Carter J., Leeks G.J.L., Lewis A.A., Meharg A.A., Wright J., 2003** – Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and floodplain systems, *Applied Geochemistry* 18(2):195-220.
- Wang Z.Y., Wu B., Wang G., 2007** – Fluvial processes and morphological response in the Yellow and Weihe Rivers to closure and operation of Sanmenxia Dam, *Geomorphology* 91(1-2):65-79.
- Wellmeyer J.L., Slattery M., Phillips J.D., 2005** – Quantifying downstream impacts of impoundment on flow regime and channel planform, lower Trinity River, Texas., *Geomorphology* 69(1-4):1-13.
- Wilkinson B.H. and McElroy B.J., 2007** – The impact of humans on continental erosion and sedimentation, *Geological Society of America Bulletin* 119(1-2):140-156.
- Wolman M.G. and Leopold L.B., 1957** – River Flood Plains: Some Observations on Their Formation. US Geological Survey Professional Paper 282-C, pp.87-109.

# Capítulo 5

## Identificación y evaluación de las externalidades

### Revisión de las leyes, reglamentos y normas mexicanas aplicables al proyecto Las Cruces, referentes a externalidades

En México el marco jurídico del agua tiene como fundamento tres artículos de la Constitución Política: 4, 27 y 115, además de la Ley de Aguas Nacionales. El artículo 4 reconoce el acceso universal al agua, de forma adecuada para su consumo. El artículo 27 señala que el agua es propiedad de la Nación y que el Estado lo administra de forma sustentable. El artículo 115, especifica que los municipios tienen a su cargo los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales.

Las externalidades se definen en la Ley de Transición Energética como impactos negativos que aún no han sido monetizados al ofertar energía eléctrica y que se originan durante las actividades de producción, generación, transformación, transmisión, distribución y entrega de dicha energía eléctrica. El daño puede ser en individuos, comunidades, al sistema climático, biodiversidad, a la disponibilidad de recursos naturales, al agua, medioambiente y a la salud.

La Ley de Transición Energética, señala en el artículo 3.III que el objeto de la Ley es incorporar las externalidades en la evaluación del costo de la energía eléctrica y de los proyectos de energía eléctrica, por lo que los costos presentados para el proyecto Las Cruces, al ser previo a esta Ley, no se presentan. En el artículo 17.VIII señala que las externalidades evitadas serán reconocidas. En el artículo 25.XIII queda manifiesto que la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, la Secretaría de Salud, la Semarnat y la Comisión Reguladora de Energía, elaborarán en coordinación una metodología para valorar las externalidades definidas en el artículo 5 de esta Ley. Los objetivos de esta metodología son:

1. Calcular previo a su construcción, el sobre-coste del proyecto y el costo nivelado de la energía eléctrica al generar.
2. En caso de instalaciones existentes, calcular el costo nivelado de la producción de las mismas.
3. LA SHCP a partir del costo asociado a las externalidades determinará la factibilidad financiera de los nuevos proyectos y calculará los costos nivelados de producción de energía eléctrica de proyectos existentes.

## Capítulo 5

Por su parte el artículo 30 de esta Ley, señala que la Semarnat aplicará la metodología para determinar las externalidades negativas debidas a las energías fósiles.

El artículo 77 señala que la SHCP deberá incorporar las externalidades en la estimación de costos de generación de energía eléctrica en los programas de inversión pública para los nuevos proyectos y en la determinación de costos de generación de energía eléctrica en instalaciones existentes. La intención expresa del presente artículo queda manifiesto en el artículo 80.V, que es nivelar los costos de energías fósiles con energías limpias, y del reconocimiento de los beneficios que estas brindan.

**Las bases del mercado eléctrico.** No aparece el término externalidad.

**Ley de la Industria Eléctrica.** La Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos, según lo señalado en la Ley de la Industria Eléctrica en el artículo 5.XXII, realizará estudios de valoración económica de las externalidades ambientales y riesgos asociados a las instalaciones, actividades y operación del Sector.

**Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.** Señala en el artículo 36 BIS que para la prestación del servicio público de energía eléctrica, la producción de energía eléctrica que resulte de menor costo para la Comisión Federal de Electricidad, considerando las externalidades ambientales para cada tecnolo-

gía, y que ofrezca óptima estabilidad, calidad y seguridad del suministro.

**Ley General de Cambio Climático.** En el artículo 32.I.g señala que se realizará un análisis sobre el sector de generación de electricidad, incluyendo los costos de las externalidades sociales y ambientales, así como los costos de las emisiones en la selección de las fuentes para la generación de energía eléctrica; artículo 34.I.d señala que se deben incluir los costos de las externalidades sociales y ambientales, así como los costos de las emisiones en la selección de las fuentes para la generación de energía eléctrica.

**Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética.** En esta ley, las externalidades se describen como impactos positivos o negativos que genera la provisión de un bien o servicio y que afectan a una tercera persona. Las externalidades ocurren cuando los costos o beneficios de los productores o compradores de un bien o servicio son distintos a los costos o beneficios sociales totales que involucran su producción y consumo. El artículo 10 señala que la SENER, con opinión de la SHCP, Semarnat y SS, elaborará una metodología para valorar las externalidades asociadas con la generación de electricidad, basada en energías renovables, en sus distintas escalas, así como las acciones políticas a que se refiera esta ley, relacionadas con dichas externalidades. Posteriormente, a partir de la metodología, la Semarnat diseñará mecanismos de regulación ambiental para el aprovechamiento de las energías renovables.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

## Matriz de correlación, ponderación y medición del impacto de externalidades del PH Las Cruces

La Tabla 1 muestra las externalidades recurrentes presentadas en la literatura, mismas que se contabilizan monetariamente en el Capítulo 8 del presente trabajo.

**Tabla 1. Compilación de externalidades documentadas con mayor recurrencia en la literatura. La ponderación se refiere al grado de impacto y de influencia sobre las demás variables presentes en la tabla; la correlación se refiere al dominio de la variable sobreespecificada en el sistema fluvial, sin considerar la escala de la misma, ya que se considera que todos son locales. Finalmente, el impacto describe las variables o parámetros de incidencia o presión sobre el sistema fluvial.**

Matriz de correlación, ponderación y nivel de impacto de las externalidades				
Externalidad	Ponderación	Correlación	Impacto	Referencias:
Emisión de gases de efecto invernadero	Alto	Cambio climático	Tamaño y tipo de reservorio, extensión de la vegetación inundada, tipo de vegetación inundada, tipo de suelo, profundidad del agua, condiciones climáticas, etc.	Mattmann <i>et al.</i> , 2016; Barros <i>et al.</i> , 2011; Delsontro <i>et al.</i> , 2010
Reducción de la conectividad del sistema acuático o alteración de los regímenes de los flujos.	Alto	Ecosistema	Sistema biótico	
Cambios en los patrones de flujos - cambios en los niveles de sedimentación	Bajo	Los patrones de flujos antinaturales de las hidroeléctricas pueden dañar las planicies de inundación, dañar a los peces y especies de aves y causar erosión.	Favorecen a los cambios rápidos en la temperatura del agua. Ambos impactos poseen un fuerte impacto en los invertebrados, los cuales son altamente sensibles a estos cambios.	Bruno <i>et al.</i> , 2009
Impacto en artefactos de importancia cultural, afectar a zonas de valor histórico o geológico.	Alto	Social, cultural	Inundación y pérdida de estos.	Han <i>et al.</i> , 2008; Lienhoop y MacMillan, 2007; Navrud, 2004
Impactos estéticos	Alto	Social, ecológico	Instalación de presa, ductos, edificios, caminos, carencia de vegetación.	Hanley y Nevin, 1999; Born <i>et al.</i> , 1998; Aravena <i>et al.</i> , 2012
Eutrofización de los cuerpos de agua	Alto	Nutrientes - organismos -biota	Acumulación de nitratos y fosfatos; provocando el "florecimiento" de algas, ocasionando la hipoxia y otros fenómenos que afectan la biota, al igual que el posible uso recreacional de estos cuerpos de agua.	Markandya, 2012

## Capítulo 5

Salud humana	Medio	Social - económico	Favorecer el criadero de vectores transmisores de enfermedades	
Salud humana	Medio	Social - ecológico	Enfermedades de transmisión sexual y adicciones	
Pérdida de agua en 4,491 gal/MWh	Alto	Ecosistema	Incremento en la pérdida de agua. Mayores tasas de evaporación.	Luyssaert <i>et al.</i> , 2008
Uso de suelo	Alto	Ecosistema - económico	Uso de suelo no en función de la producción de energía. 538 - 3068 m <sup>2</sup> /GWh, el reservorio de almacenamiento puede ser estimado con el factor de 122 m <sup>2</sup> /MWh/año; NREL estima 0.25 acres/MW (1012 m <sup>2</sup> /MW).	Hadian <i>et al.</i> 2013; The National Research Council, 2010; NREL, 2012
Construcción	Bajo	Ecosistémico	Ruido	European Commission, 1995
	Bajo	Población	Accidentes	
	Bajo	Calidad del aire- cambio climático	Emisiones de automotores	
	Medio	Económico - población	Pérdida de producción campos agrícolas	
Alteración de flujo - operación	Alto	Ecosistémico	Pérdida de hábitat	
	Alto	Pérdida de servicio ambiental	Pérdida de terrenos productivos	
Embalse - presa y control de flujos	Alto	Agricultura - economía y social	Pérdida de tierras	
	Alto	Forestal - economía y social	Pérdida de producción	
	?	Salud	Elevación de la concentración de Hg en peces	
Obras y operación de transmisión de energía eléctrica	Bajo - alto	Ecosistémico	Ruido, pérdida de hábitat, muerte, accidentes, enfermedades, contaminación visual, pérdida de producción	

### Impacto Sobre la Herencia Cultural (ISHC)

Se refiere al análisis de los potenciales impactos, negativos y positivos, en todo el amplio rango de recursos culturales de un área, que son el resulta-

do del desarrollo propuesto o trabajos o tendencias ambientales; y del diseño de medidas para mitigar impactos los cuales son inaceptables y maximizan aquellos que son benéficos.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Al no contar en el país con un mecanismo o protocolo adecuado, hemos compilado los requisitos mínimos necesarios para realizar estudios de ISHC (i.e., NZTA, 2015, Rogers A. P., 2013, Rusalic D., 2009, Brandt A.S. y Hassan F., 2000).

El ISHC se compone de los siguientes tres estudios básicos y recomendaciones a partir de estos<sup>(1)</sup>:

- 1. Estudio de la Línea Base<sup>(2)</sup>** (antes del proyecto). Esta parte del estudio fue conducido de forma incompleta, ya que no cumple con los requerimientos mínimos para poder evaluar o ponderar la herencia cultural de las poblaciones. Sin embargo es adecuado para conocer como es la vida “actual” de las comunidades que ahí coexisten. Los informes presentados por CFE cubren ampliamente el componente social.
- 2. Estudio del Diseño e Implementación** (del proyecto). Los informes técnicos de los estudios presentados por CFE cumplen cabalmente con este componente.
- 3. Estudio de Impactos<sup>(3)</sup>** (durante la construcción y operación del proyecto). CFE no presenta sus resultados bajo el formato requerido.
- 4. Recomendaciones de Mitigación.** No se tiene ninguna recomendación por parte de CFE.

<sup>(1)</sup> Como puede observarse, gran parte de los componentes ya han sido cubiertos por la CFE en varios informes, por lo que solo se discutirá la información presentada en ellos, y se emitirán las recomendaciones necesarias sobre estudios adicionales o complementarios para cumplir con una correcta Evaluación del Impacto Sobre la Herencia Cultural.

<sup>(2)</sup> El estudio de Línea Base, revisa el estudio de los edificios considerados herencia cultural, así como monumentos, construcciones, etc. Además, de los artefactos encontrados en ellos, como son objetos arqueológicos, en algunos casos es necesario realizar estudios de arqueología marina.

<sup>(3)</sup> Los estudios de impactos debería analizar estos en impactos directos, indirectos y acumulativos. A su vez estos impactos son subdivididos en tangibles e intangibles, inamovibles, móviles y viviente/inerte.

### Referencias

**Mattmann M., Logar I. y Brouwer R., 2016** – Hydro-power externalities: A meta-analysis, *Energy Economics*, 57:66-77 p.

**Markandya A., 2012** – Externalities from electricity generation and renewable energy. Methodology and application in Europe and Spain, *Cuadernos Económicos del ICE*, 83: 85-99.

**Sheldon S., Hadian S. y Zik O., 2015** – Beyond carbon: Quantifying environmental externalities as energy for hydroelectric and nuclear power, *Energy*, 84:36-44.

**European Commission, 1995** – ExternE: Externalities of Energy - EUR 16520, vol.6: Wind and Hydro, 252 p.

**Brandt A.S. y Hassan F., 2000** – Dams and Cultural Heritage Management - Final Report, World Commission on Dams, 77 p.

**Rusalic D., 2009** – Making the intangible tangible: The new interface of cultural heritage, Institute of Ethnography SASA, Belgrade, 198 p.

**Rogers A. P., 2013** – Cultural Heritage Impact Assessment: Making the Most of the Methodology, Archaeological Assessments LTd., Hong Kong, 7 p.

**NZTA, 2015** – Historic heritage impact assessment guide for state highway projects, NZ Transport Agency, New Zeland Government, 43 p.

# Capítulo 6

## Compilación histórica de la calidad del agua en la cuenca hidrológica donde se encontraría el proyecto Las Cruces

### Creación de base de datos (BD) con la información recabada

El país cuenta con escasa información sobre la calidad del agua, la información más completa data desde el año 2006 y ha evolucionado a través del tiempo. Los datos más recientes son del año 2016. De la información disponible, solo se consideraron cuatro estaciones localizadas aguas abajo de donde

se encontraría el PH Las Cruces, de ser construida; no se tienen estaciones aguas arriba. Toda la información se tomó de la siguiente dirección:

<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=calidadAgua>

### Ingresar la BD a sistema de información geográfica (SIG)

La información disponible se compiló en la siguiente Base de Datos:

**Tabla 1. Calidad de agua en la cuenca hidrológica donde se pretende construir el proyecto Las Cruces.**

	Estación	DLNAY1942	DLNAY1867	DLNAY1868	DLNAY1869
	Nombre	San Pedro Ixcatán	El Venado	Río San Pedro 16	Río San Pedro 21
2016	DBO5	0.5	0.5	0.5	0.5
	DQO	12.01	2.5	9.97	6.865
	SST	86.915	7.5	5.5	4.75
	SDT				
2015	DBO5	1	1	1	1
	DQO	23.75	31.69	28.22	43.34
	SST	332.5	437.5	477.5	357.5
	SDT				
2014	DBO5	6.4	4.85	4.25	2.65
	DQO	38.02	32.5	29.82	27.59
	SST	139.4	41.25	24.5	48.75
	SDT				
2013	DBO5	3.38	3.88	4.05	2.92
	DQO	25.17	40.6	34.91	39.8
	SST	147.16	150	160	474.5
	SDT				

## Capítulo 6

2012	DBO5		1.61	3.96	4.45
	DQO		16.8	9.02	13.85
	SST		6	7.75	5
	SDT				
2011	DBO5		1.38		
	DQO		14.91		
	SST		12		
	SDT				
2010	DBO5		1.3		
	DQO		11.72		
	SST		8.5		
	SDT				
2009	DBO5		2.22		
	DQO		16.64		
	SST		102		
	SDT				
2008	DBO5		2.12		
	DQO		21.67		
	SST		20		
	SDT				
2007	DBO5		2.13		
	DQO		11.39		
	SST		36		
	SDT				
2006	DBO5		2.95		
	DQO		7.97		
	SST				
	SDT				

## Creación de mapas y gráficos para su interpretación

Por la baja densidad de estaciones y carente compilación histórica, no es posible llevar a cabo la creación de mapas o gráficos. Lo único que se puede considerar de la información es una interpretación directa como sigue:

### Escalas de clasificación de la calidad del agua

#### Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)

0	<	DBO5	<=	3	Excelente	No contaminada	Azul
3	<	DBO5	<=	6	Buena Calidad	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable	Verde
6	<	DBO5	<=	30	Aceptable	Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	Amarillo
30	<	DBO5	<=	120	Contaminada	Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal	Naranja
120	<	DBO5	-	-	Fuertemente Contaminada	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales	Rojo

#### Demanda Química de Oxígeno (mg/l)

0	<	DQO	<=	10 <th>Excelente</th> <th>No contaminada</th> <th>Azul</th>	Excelente	No contaminada	Azul
10	< <td>DQO</td> <td>&lt;= <td>20</td> <td>Buena Calidad</td> <td>Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable</td> <td>Verde</td> </td>	DQO	<= <td>20</td> <td>Buena Calidad</td> <td>Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable</td> <td>Verde</td>	20	Buena Calidad	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable	Verde
20	< <td>DQO</td> <td>&lt;= <td>40</td> <td>Aceptable</td> <td>Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente</td> <td>Amarillo</td> </td>	DQO	<= <td>40</td> <td>Aceptable</td> <td>Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente</td> <td>Amarillo</td>	40	Aceptable	Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	Amarillo
40	< <td>DQO</td> <td>&lt;= <td>200</td> <td>Contaminada</td> <td>Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal</td> <td>Naranja</td> </td>	DQO	<= <td>200</td> <td>Contaminada</td> <td>Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal</td> <td>Naranja</td>	200	Contaminada	Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal	Naranja
200	< <td>DQO</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>Fuertemente Contaminada</td> <td>Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales</td> <td>Rojo</td>	DQO	-	-	Fuertemente Contaminada	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales	Rojo

#### Sólidos Suspendedos Totales (mg/l)

0	<	SST	<=	25 <th>Excelente</th> <th>Clase de excepción, muy buena calidad</th> <th>Azul</th>	Excelente	Clase de excepción, muy buena calidad	Azul
25	< <th>SST</th> <th>&lt;=</th> <th>75</th> <th>Buena Calidad</th> <th>Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable</th> <th>Verde</th>	SST	<=	75	Buena Calidad	Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable	Verde
75	< <th>SST</th> <th>&lt;=</th> <th>150</th> <th>Aceptable</th> <th>Aguas superficiales con indicio de contaminación. Con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente</th> <th>Amarillo</th>	SST	<=	150	Aceptable	Aguas superficiales con indicio de contaminación. Con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	Amarillo
150	< <th>SST</th> <th>&lt;=</th> <th>400</th> <th>Contaminada</th> <th>agrícola restringido</th> <th>Naranja</th>	SST	<=	400	Contaminada	agrícola restringido	Naranja
400	< <th>SST</th> <th>-</th> <th>-</th> <th>Fuertemente Contaminada</th> <th>Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces</th> <th>Rojo</th>	SST	-	-	Fuertemente Contaminada	Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces	Rojo

# Capítulo 7

## Creación de una matriz con parámetros y factores hidrogeoquímicos-hidrológicos de mayor interés para evaluar el carácter y magnitud de los procesos de ajuste del sistema hidrológico-ambiental

### Evaluación de los parámetros y factores hidrogeoquímicos-hidrológicos aplicables a Las Cruces

La conjunción de los parámetros y variables hidrogenoquímicas e hidrológicas convergen en la descripción de la calidad del agua, ya que esta magnitud o clasificación determina los posibles usos de esta, así como de las repercusiones en el sistema. Por tanto, tiene mayor sentido evaluar la calidad del agua y entender el significado de los procesos que están teniendo lugar. Se invita al lector a revisar el Capítulo 4 de este escrito. Por tanto, los parámetros físicos más importantes para evaluar la calidad del agua son la transparencia, turbidez, color, olor, sabor, temperatura, conductividad eléctrica y pH.

Los parámetros de calidad del agua que deben ser evaluados son los siguientes:

- a. **Microbiológicos:** Organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales, huevos de helminto y plancton (fitoplancton y zooplancton).
- b. **Fisicoquímicos:** Alcalinidad (como  $\text{CaCO}_3$ ), color, turbiedad, cianuros (como  $\text{CN}^-$ ), cloruros (como  $\text{Cl}^-$ ), conductividad eléctrica, dureza total (como  $\text{CaCO}_3$ ), fenoles o compuestos fenólicos, fluoruros (como  $\text{F}^-$ ), pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, sulfatos (como  $\text{SO}_4^{=}$ ), sustancias activas al azul de metileno (SAAM), trihalometanos totales, grasas y aceites, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO), y turbiedad Secchi.
- c. **Metales pesados:** aluminio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo total, fierro, manganeso, mercurio, plomo, sodio, zinc.
- d. **Plaguicidas:** aldrin y dieldrin (separados o combinados), clordano (total de isómeros), DDT (total de isómeros), gamma-HCH (Lindano), hexaclorobenceno, heptacloro y epóxido de heptacloro, metoxicloro, 2,4-D.
- e. **Nutrientes:** nitratos (como N), nitritos (como N), nitrógeno amoniacal (como N), fósforo total, fosforo de ortofosfatos.

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Los parámetros físicos más importantes a evaluar son la transparencia, turbidez, color, olor, sabor, temperatura, conductividad eléctrica y pH. Los parámetros químicos se agrupan en:

- ▼ Sustancias presentes naturalmente y sustancias vertidas artificialmente.
- ▼ Sustancias y caracteres estables, inestables, ligeramente estables.
- ▼ Sustancias presentes habitualmente en cantidades grandes (iones más importantes, oxígeno disuelto, etc., y algunos contaminantes, como detergentes y derivados del petróleo) y sustancias presentes en cantidades pequeñas.

El muestreo de agua se realizará según los lineamientos técnicos establecidos en los Métodos Normalizados Para el Análisis de Aguas Potables y Residuales, APHA, AWWA-WDCF (1992), y los lineamientos técnicos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-14-1980 “Cuerpos receptores, muestreo”, (CFE,2013).

### Cálculo de los índices de calidad del agua

México ha desarrollado un indicador práctico para evaluar la calidad del agua (ICA) para describir la calidad de su agua superficial. Los rangos del ICA van desde 0 (tóxico) a 100 (prístino). El indicador es una composición de más de 18 variables (e.g., DBO, oxígeno, coliformes, nutrientes y sólidos suspendidos) (SS, 2015). Para el cálculo del índice de

calidad del agua (ICA), se aplica la metodología de Martínez de Basarán (1979), y se utilizan los siguientes parámetros para su construcción: Aluminio, arsénico, cadmio, cloruros, coliformes totales, color, conductividad, cromo total, dureza total, fósforo total, hierro, manganeso, mercurio, nitratos, nitritos, oxígeno disuelto, pH, plomo, detergentes (S.A.A.M.), sólidos disueltos, sulfatos, temperatura y turbiedad.

Por otra parte, un indicador similar emplea 11 parámetros para calcular WQI; pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), color, turbidez, amoníaco, nitrógeno, fluoruros, cloruros, sulfatos, Sólidos Totales (STD) y el fósforo (P). El WQI se puede clasificar como sigue: <2.3 pobre; de 2.3 a 2.8 buena; y >2.8 excelente (Rubio-Arias *et al.*, 2012).

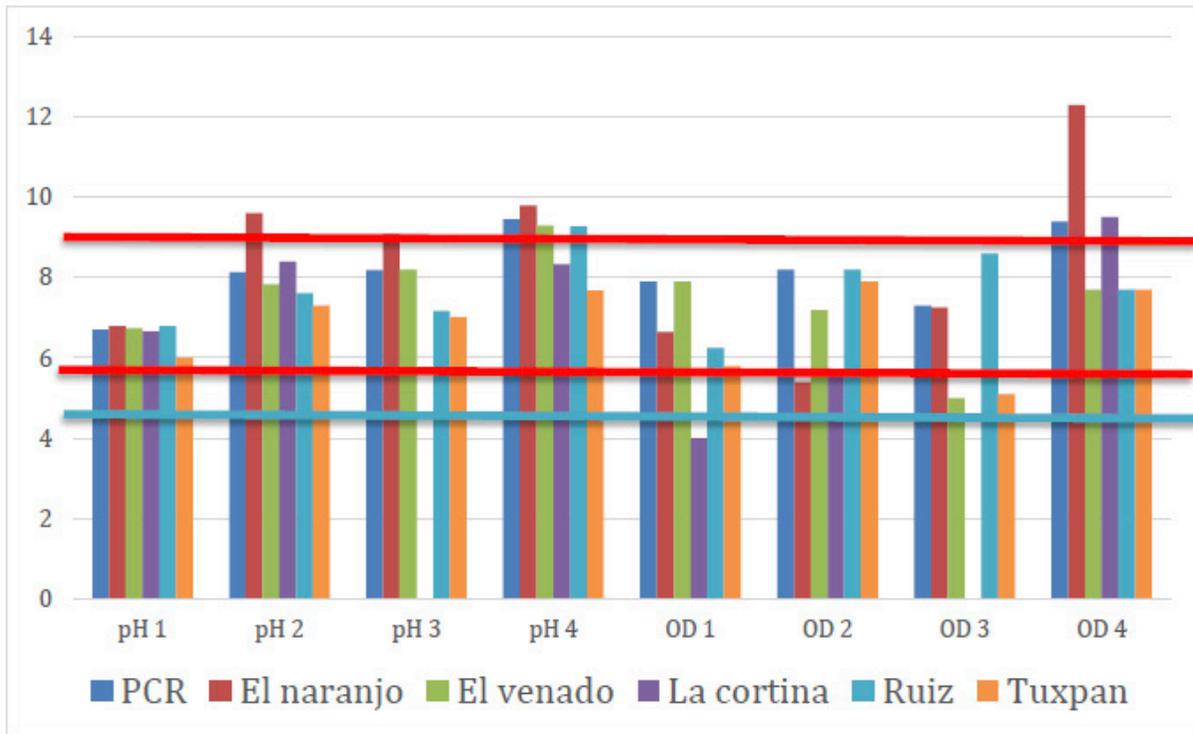
### Investigar los parámetros de operación del proyecto Las Cruces

Los valores de pH en varios puntos de muestreo para el sistema fluvial se muestran en la Figura 1. Se puede observar que los valores más grandes de pH se presentan en el punto El Naranjo, mientras que el valor más alto de OD ocurre en El Naranjo.

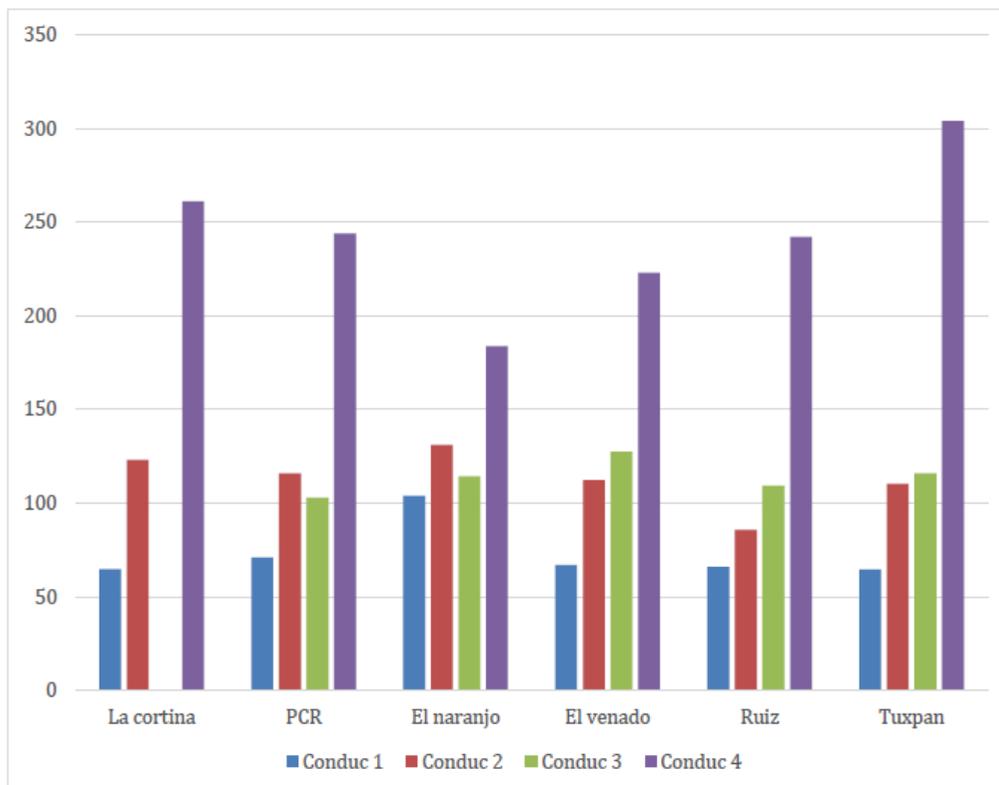
La conductividad eléctrica en los cuatro muestreos se presentó en un intervalo de 64.9 a 304 microS/cm, presentándose los valores más altos en la época de secas, donde se concentran los iones, mientras que en lluvias en el sitio de la cortina se determinaron los valores más bajos (Figura 2).

## Capítulo 7

**Figura 1. Comportamiento del pH y oxígeno disuelto (OD). Las líneas rojas corresponden al intervalo del pH y la línea azul al límite de OD para la protección de vida acuática.**



**Figura 2. Comportamiento de la conductividad en los puntos de muestreo en temporada de lluvia y de secas (conductividad 4).**



## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

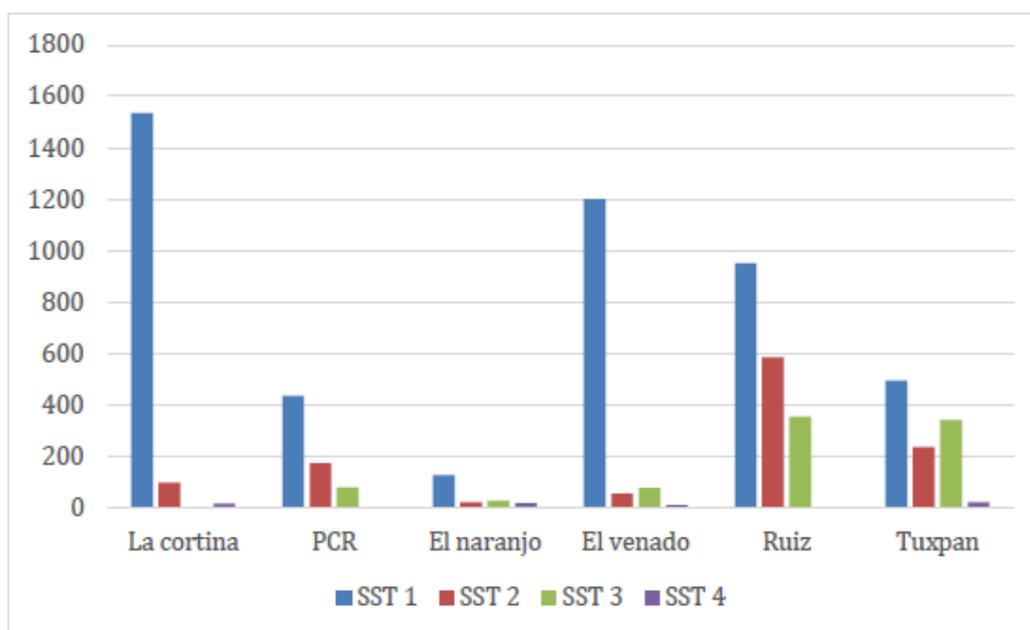
Los resultados para los sólidos suspendidos totales oscilaron de < 10 hasta 1536 mg/l (Figura 3). En el sitio de la cortina en el primer muestreo se considera como contaminado por presentarse concentraciones mayores a 400 mg/l, lo cual se debe al aporte de sólidos correspondientes al inicio de lluvias. Mientras que para la demanda química de oxígeno que presentó concentraciones de < 10 hasta 179 mg/l se considera contaminada para el sitio de Tuxpan (DQO 2) en donde se determinó la mayor concentración en la época de lluvias y para la demanda bioquímica de oxígeno de excelente calidad en todos los muestreos (DBO 1, 2, 3 y 4) por las bajas concentración de materia orgánica.

La concentración de fósforo osciló entre < 0.02 hasta 2.68 mg/l, y en el sitio El Naranjo fue en donde se determinó la mayor concentración en el primer muestreo de lluvias, debido a los escurrimientos

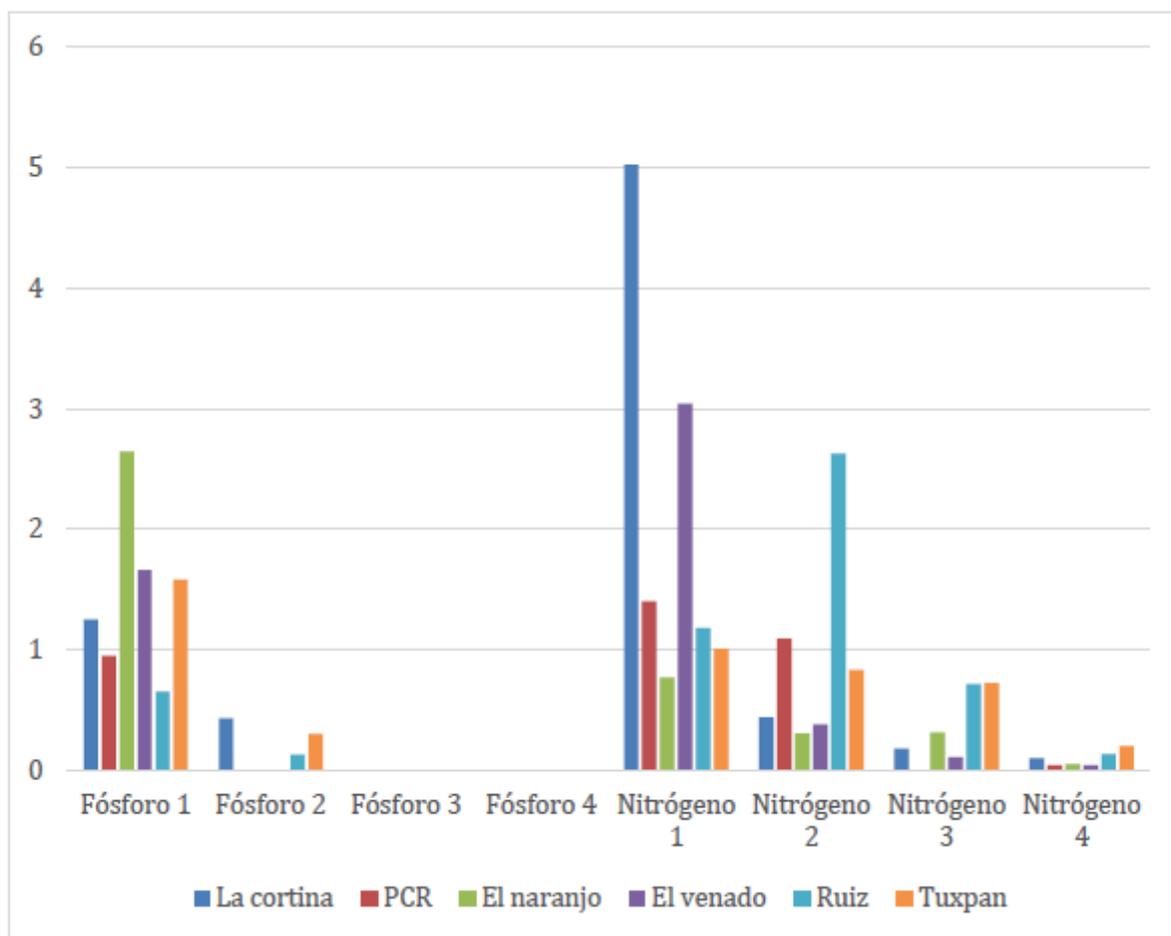
que incrementan los aportes de nutrientes al río. En los siguientes muestreos disminuyó el aporte debido a que el arrastre de sólidos disminuye hacia el cauce del río, correlacionándose con la Figura 3 de sólidos suspendidos totales. La concentraciones de fósforo estuvieron por arriba del criterio ecológico para protección de vida acuática para ríos que es de 0.1 mg/l y de 0.05 mg/l establecido en la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de la Conagua, 2010; Figura 4. Para el nitrógeno las concentraciones oscilaron entre 0.04 hasta 5.02 mg/l, detectándose el máximo valor en el sitio de la cortina en el primer muestreo que corresponde a la época de lluvias, disminuyendo hasta presentarse el mínimo en la época de secas (Figura 4).

El grado de acidez, que constituye el pH del agua, refleja el contenido de CO<sub>2</sub>, así como la presencia de ácidos orgánicos y contaminación. Un valor alto

**Figura 3. Comportamiento de los sólidos suspendidos totales en mg/l, para períodos de lluvias y secas (SST 4).**



**Figura 4. Comportamiento de los nutrientes nitrógeno y fósforo en los sitios de muestreo (mg/l).**



de pH en un arroyo, se asocia con aguas ricas en sales, carbonatos y bicarbonatos. Estos arroyos albergan más vida acuática y mayores poblaciones de peces que un arroyo con aguas ácidas, con un contenido de nutrientes bajos. En febrero el pH fue de 8.5 en El Naranjo del Río San Pedro (CFE, 2013a) (Tabla 1).

### Investigar los parámetros naturales del sistema fluvial afectado

El estudio que indica la cantidad de masa, el volumen de agua y parámetros referentes a la velocidad del agua, así como del caudal, se presentan adecuadamente en la Tabla 5 del documento Dinámica Fluvial Final V2 (CFE, 2013a). La cuantificación de la pre-

cipitación, evaporación y evaporación neta, lo hace de manera suficiente y adecuadamente, el resultado se encuentra en la Tabla 4-8 del documento Anexo IV.11 Estudio Hidrológico. De la Tabla 4-8 el único parámetro sobre el cual se tiene influencia es sobre la evaporación y por tanto la evaporación neta; se registra una evaporación neta de -384.08 mm. Otro comportamiento del sistema de gran importancia es la continuidad del mismo, esto es, que la energía y masa que ingresa al sistema operen siempre con la mínima cantidad de energía, y se homogenicen los parámetros de operación. El sistema fluvial en estudio posee un operación homogénea considerablemente importante como lo muestra la Figura 5 y Figura 6.

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Tabla 1. Sitios de muestreo y parámetros fisicoquímicos registrados en el agua y ambiente del sistema fluvial en estudio.**

Fecha de muestreo	Localidad	Características Ambiente		Características del agua			
		T° C	%Humedad Relativa	T° C agua	pH	Oxigeno mg. l	Cla mg.m <sup>-3</sup>
27/02/13	1 Cortina						0.07
27/02/13	2 Naranja y PCR	24.6	52.3	27.5	8.52	9.3	0.04
27/02/13	3 Tenamache	26.5	52.3	24.9	8.1	12.3	-
28/02/13	4 El Venado	24.2	53.2	23.7	7.4	7.7	0.05
28/02/13	5 Ruíz	30.8	44.6	26.1	7.8	7.7	0.06
28/02/13	6 Tuxpan	26.7	49.1	26.6	7.4	7.7	0.06

La Tabla 5-1 del documento FLUVITECNO (2012), resume los valores de los parámetros que intervienen en el cálculo de la disponibilidad de agua superficial para la cuenca del río San Pedro, en esta se registra una clara disponibilidad, según se publica en el Diario Oficial de la Federación el 27 de agosto de 2013. Otro aspecto de suma importancia es el comportamiento del sistema fluvial ante eventos meteorológicos extraordinarios. La Tabla 2 presenta el resultado del análisis realizado para el proyecto hidroeléctrico Las Cruces (FLUVITECNO, 2012),

en las estaciones El Capomal, San Pedro y Acaponeta.

En el caso de los huracanes Naomi y Lidia presentados en 1968 y 1993, respectivamente, fueron los eventos meteorológicos que más efectos devastadores han generado en la cuenca del río Acaponeta y en menor medida en la cuenca del río San Pedro, pero sin dejar de ser considerables. El efecto del huracán Lidia ocasionó una avenida de 7,969 m<sup>3</sup>/s, para este mismo año, el BANDAS<sup>(1)</sup> reporta 6,302 m<sup>3</sup>/s en la

## Capítulo 7

Figura 5. Hidrograma comparativo entre las estaciones hidrométricas San Pedro y Pajaritos durante el año 2003, (FLUVITECNO, 2012).

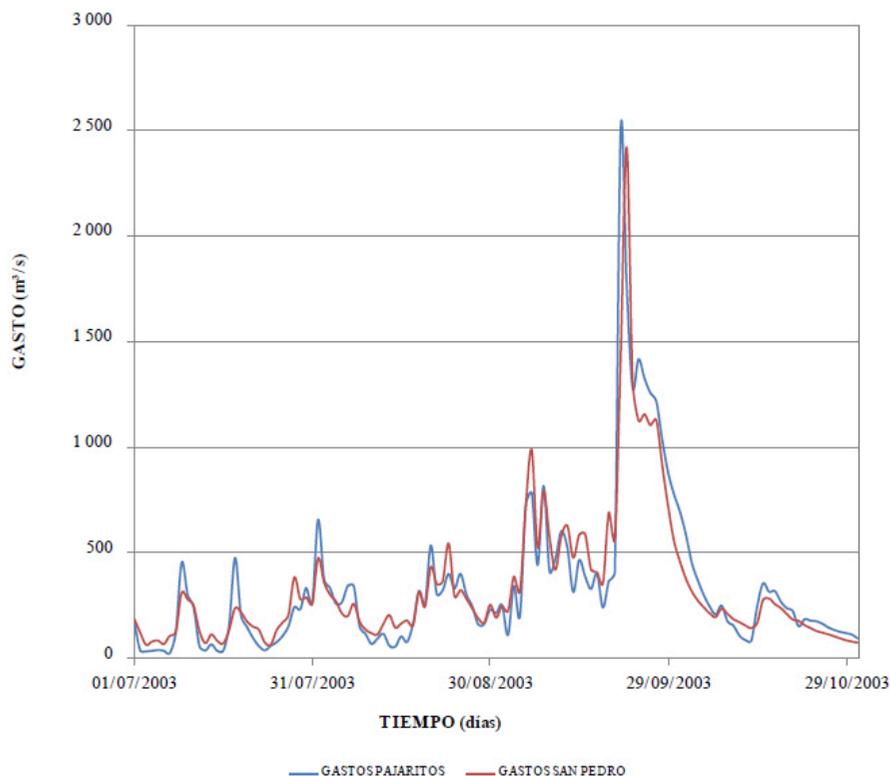
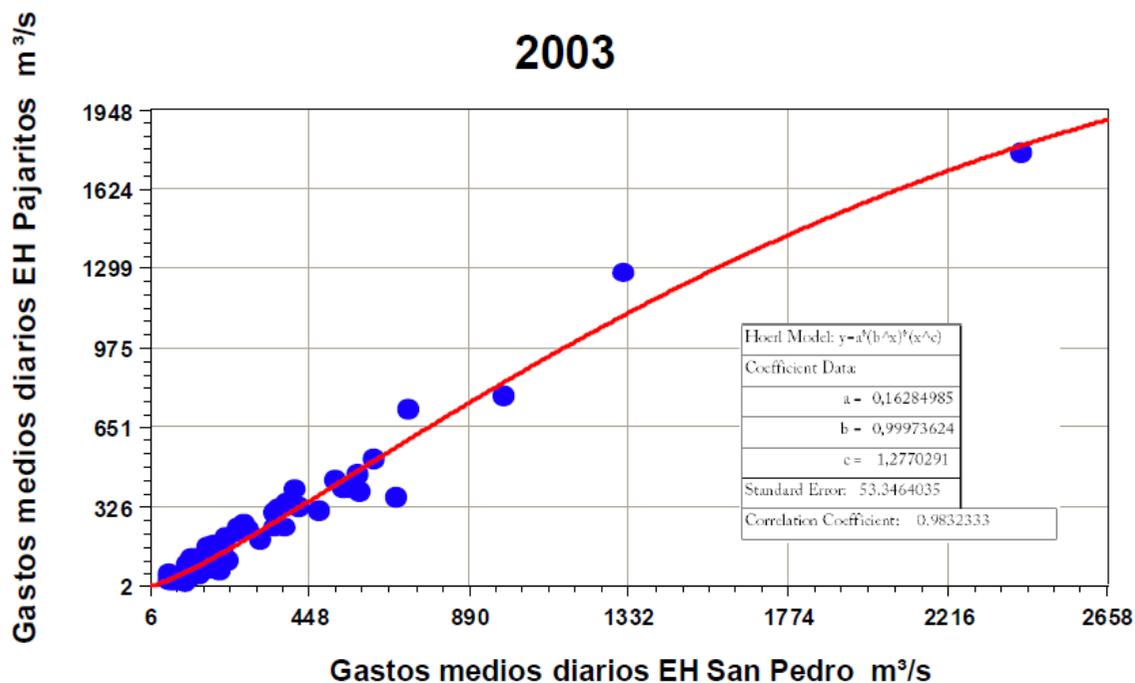


Figura 6. Curva de correlación entre los registros de las estaciones San Pedro y Pajaritos durante el año 2003. (FLUVITECNO, 2012).



## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Tabla 2. Gastos máximos y eventos meteorológicos registrados en las estaciones El Capomal, San Pedro y Acaponeta, para el periodo 1968 - 2003 (FLUVITECNO, 2012).**

Año	Fecha	E. H. El Capomal	Fecha	E. H. San Pedro	Fecha	E. H. Acaponeta	Eventos meteorológicos extremos
		Gasto máximo m <sup>3</sup> /s		Gasto máximo m <sup>3</sup> /s		Gasto máximo m <sup>3</sup> /s	
1968	13-sep	2 025	14-sep	4 800	13-sep	16 000	Huracán (1) Naomi 10-13 de septiembre
1972	25-nov	2 280	24-nov	5 045	24-nov	7 050	Lluvias extremas
1985	17-ene	1 856	14-ene	4 230	13-ene	5 096	Lluvias extremas
1993	13-sep	665	13-sep	7 626	13-sep	7 944	Huracán(2) Lidia septiembre
1994	14-oct	310	14-oct	9 180	14-oct	1 409	Huracán (2) Rosa 11-14 de octubre
2003	22-sep	4 137	22-sep	4 652	21-sep	538	Lluvias extremas

(1) Huracán categoría 1 (2) Huracán categoría 2

Escala Saffir-Simpson

misma estación. El huracán Rosa presentado en 1994, generó la avenida reportada de 9,032 m<sup>3</sup>/s en la estación San Pedro. En el caso de los años 1972, 1985 y 2003, las lluvias extremas ocasionaron avenidas en la cuenca del río San Pedro, mismas que se confirman, para los dos primeros años, con la estación Acaponeta y para el 2003 con la estación Capomal (FLUVITECNO, 2012). El escurrimiento medio anual que se determinó en el sitio del proyecto fue de 2,560.18 hm<sup>3</sup> con un periodo de registro de 68 años, desde 1944 a 2011, lo que representa un gasto medio diario de 81.12 m<sup>3</sup>/s (FLUVITECNO, 2012). La estación hidrométrica San Pedro cuenta con registros importantes para los años de 1993 y 1994, en los que en el BANDAS se mostraron gastos máximos de 6,302 y 4,846 m<sup>3</sup>/s, los cuales, al ser validados, se incrementaron a 7,626 y 9,180 m<sup>3</sup>/s respectivamente (FLUVITECNO, 2012).

CFE (2013b)<sup>(2)</sup> presenta un estudio bastante completo de aquellos parámetros para evaluar la calidad del agua, para el año 2010. A continuación, solo se presentará -aproximadamente- el parámetro y el valor mínimo y máximo registrado:

- ▼ pH: 6 - 8
- ▼ Conductividad: 20 - 850 µs/cm.
- ▼ Salinidad: 0-28 ppm.
- ▼ Sólidos Disueltos Totales: 10-1380 mg/l.
- ▼ Óxido Disuelto: 1 - 6 mg/l.
- ▼ Coliformes Totales: 0 - 100,000 UFC/100 ml.
- ▼ Coliformes fecales: 0 - 22500 UFC/100 ml.

## Capítulo 7

▼ Aluminio: 0 - 12 mg/l.

▼ Dureza Total: 0 - 6200 mg/l.

▼ Arsénico: 0 - 0.075 mg/l.

▼ Cloruros: 0 - 75,000 mg/l.

▼ Bario: 0.05 - 0.68 mg/l.

Igualmente importante que los datos es la forma en la que estos fueron producidos, por tanto, la Tabla 3 muestra la metodología empleada para medir cada parámetro (CFE, 2013b).

▼ Cromo: 0 - 0.03 mg/l.

▼ Hierro: 0 - 7 mg/l.

En México las especificaciones de contaminantes y de calidad se señalan en los “Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CCA-001-89”, en la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, en los indicadores de calidad del agua de la Conagua y para el caso de descargas de aguas residuales a cuerpos receptores definidos en la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-2010.

▼ Silicio: 5 - 65 mg/l.

▼ Plomo: 0 - 0.034 mg/l.

▼ Sodio: 0 - 10,200 mg/l.

▼ Zinc: 0 - 0.12 mg/l.

**Tabla 3. Parámetros a evaluar en el agua (CFE, 2013b)<sup>(3)</sup>.**

**Tabla 2. Parámetros a evaluar en agua**

Parámetro	Unidad	Método Analítico
Alcalinidad a Fenolftaleína.	mg/l CaCO <sub>3</sub>	2320-B*
Alcalinidad Total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	2320-B*
Aluminio	mg/l	NOM-117-SSA1-1994
Arsénico	mg/l	NOM-117-SSA1-1994
Cadmio	mg/l	NOM-117-SSA1-1994
Cloruros	mg/l	NOM-AA-73-1981
Color	Esc. Pt.-Co.	NOM-AA-45-1981

<sup>(3)</sup> IV.3.3 Calidad del Agua extenso llluvias 2012.

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

### Matriz recomendada para evaluar el sistema fluvial en caso de instalarse el proyecto Las Cruces

Parámetro	Unidad	Método Analítico
Conductividad	$\mu\text{mhos}/\text{cm}^2$	2510-B*
Cromo total	mg/l	NOM-117-SSA1-1994
D.Q.O.	mg/l	5220-B*
Dureza Calcica	mg/l $\text{CaCO}_3$	NOM-AA-72-1981
Dureza Magnesica	mg/l $\text{CaCO}_3$	NOM-AA-72-1981
Dureza Total	mg/l $\text{CaCO}_3$	NOM-AA-72-1981
Fósforo (Ortofosfatos)	mg/l $\text{P-PO}_4$	4500-P-E*
Fósforo Total	mg/l $\text{P-PO}_4$	4500-P-C*
Hierro	mg/l	NOM-117-SSA1-1994
Manganeso	mg/l	NOM-117-SSA1-1994
Mercurio	mg/l	NOM-117-SSA1-1994
Nitratos	mg/l $\text{N-NO}_3$	NOM-AA-82-1986
Nitritos	mg/l $\text{N-NO}_2$	NOM-AA-99-1987
Oxígeno Disuelto	mg/l	4500-O-C*
pH	pH	NOM-AA-08-1980
Plomo	mg/l	NOM-117-SSA1-1994
S.A.A.M.	mg/l	NOM-AA-39-1980
Sólidos Disueltos Totales.	mg/l	NOM-AA-20-1980
Sulfatos	mg/l $\text{SO}_4$	NOM-AA-74-1981
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	2550-B*
Turbiedad	UTN	NOM-AA-38-1981
Turbiedad Secchi	cm	
(*) APHA, AWWA-WDCF, 1992,		

## Capítulo 7

Con base en el análisis de los parámetros estudiados y la factibilidad de incluirlos como monitores en un futuro cercano, se recomienda dar continuidad a los siguientes parámetros, en los lapsos de tiempo que se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4. Parámetros recomendados para evaluar el sistema fluvial.**

Parámetro	Tiempo	Implicación
WQI Water Quality Index+	Mensual	Determina los posibles usos del agua y si existe un riesgo en su consumo.
ICA Índice de Calidad del Agua+	Mensual	Determina los posibles usos del agua y si existe un riesgo en su consumo.
Comparación de Hidrogramas	Anual	Determina el ajuste morfológico y de operación del sistema fluvial, se puede correlacionar a la energía disponible para el transporte de alimento, sedimentos, o para iniciar procesos erosivos.
Evaluar la correlación entre hidrogramas	Anual	Sirve para comparar cambios en el nivel energético de las porciones que componen el sistema fluvial.
+ prácticamente WQI y ICA están constituidos de la misma forma, sin embargo ICA es más completo y se recomienda su uso sobre WQI.		

## Referencias

- SS, 2005** – Children´s Health and the Environment in North America - A first report on available indicators and measures, Country Report: Mexico, Secretaría de Salud, 103 p.
- Rubio-Arias H., Contreras-Caraveo M., Quintana R.M., Saucedo-Teran R.A. y Pinales-Munguia A., 2012** – An Overall Water Quality Index (WQI) for a Man-Made Aquatic Reservoir in Mexico, International Journal of Environmental Research and Public Health, 9, 1687-1698 pp.
- FLUVITECNO, 2012** – Caracterización del cauce y estudio fluviomorfológico del río San Pedro, Nayarit, México, 2o Informe-Informe Final, 273 p.
- CFE, 2013** – IV.3.3 Calidad del Agua extenso lluvias 2012.
- CFE, 2013a** – Capítulo VIII.2 Anexos - Capítulo II.4 Emisiones Herramientas para la integración del flujo ambiental, en Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces, Comisión Federal de Electricidad, 202 pp.
- CFE, 2013b** – Capítulo IV Calidad del agua (extenso) estiaje 2010 IV.3.2 - Capítulo VIII.2 Anexos, 242 p.

# Capítulo 8

## Evaluación económica del proyecto Las Cruces, considerando las externalidades, matriz de parámetros y factores hidrogeoquímicos e hidrológicos, así como los geoindicadores

### Integración de las matrices con externalidades, parámetros y factores hidrogeoquímicos - hidrológicos, y geoindicadores en términos monetarios

La Tabla 1 integra las distintas variables y las clases a las que pertenecen en términos monetarios para el contexto mexicano y para el año 2018.

**Tabla 1. integración de las variables más asequibles en términos monetarios para determinar la sustentabilidad de un proyecto hidroeléctrico (valores para 2018).**

Clase	Variable	Monto
Hidrogeoquímico	Pérdida de nitrógeno.	\$ 115.48 pesos/ha
	Pérdida de fósforo.	\$ 178.81 pesos/ha
	Pérdida de potasio.	\$ 117.34 pesos/ha
Hidrológicos	No aplica a menos que ocurra un accidente ambiental.	Son generalmente invaluable, se estiman como la suma de las externalidades.
Geoindicadores	Pérdida de suelo.	\$ 301.75 - 603.51 pesos por hectárea o \$ 4,619.48 pesos por tonelada.
	Pérdida de nutrientes.	\$ 411.65 pesos por hectárea.
Propios de la actividad	Costos fijos de operación y mantenimiento.	\$ 447.04 pesos/MW*
	Costo unitario de inversión.	\$ 35,391.1 pesos /MW*
	Costos fijos de operación y mantenimiento.	\$ 178,706,478.60 pesos/año
	Seguro de la Instalación.	No hay datos.
Externalidades	Sociales.	Valor Estadístico de Vida = \$ 4,377.32-6,053.74 pesos (2002-2017).
		Valor de un Año de Vida Perdido = \$ 13,327 a \$ 22,917 pesos**.
		Ingreso Corriente Promedio Trimestral por Hogar según Entidad Federativa (2016). Nayarit = \$ 28,704 pesos rural.***
	Cultural.	\$ 11,913,765.24 pesos**
	Salud.	\$ 18.8353 pesos/kWh&
	CO <sub>2</sub>	\$ 335.284 pesos/tCO <sub>2</sub>

\* COPAR-CFE, 2016. \*\* Spadaro, 1999; Hammit-Ibarrarán, 2006. \*\*\* INEGI, 2018. & Richer et al., 2010; Platts, 2015.

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

El costo calculado durante el 2012 para el proyecto Las Cruces fue de \$ 7,995 millones de pesos, mismo que se elevó aproximadamente un 23 % debido al incremento de los insumos empleados en las obras públicas (Tabla 2), en \$ 9,833.85 millones de pesos. Sin embargo, si se considera el costo del dólar desde \$ 12.5 a \$ 18.62 pesos por dólar (Calculadora-SAT, 2018), el monto se actualiza en por lo menos \$

11,913,765,240.00 pesos. El monto autorizado para el proyecto es de tan solo \$ 7,325,000,000 pesos, es decir, falta por cubrir \$ 4,588,765,240 pesos, el ~63 % del costo total. Cabe señalar que no se consideran varios de los costos de la Tabla 1.

**Tabla 2. Incremento del costo de los insumos empleados en obras públicas para el periodo 2012 - 2018 (INEGI,2018).**

Índice nacional de precios productor. Base junio 2012=100 (SCIAN 2007), Insumos de obras públicas, Actualización de costos de las obras públicas, materiales industrializados	Diferencia de costo Dic 2012 - Feb 2018	% de variación
Varilla corrugada	\$ 19.59	17.15
Estructuras	\$ 23.31	20.04
Nitrógeno, oxígeno y gas carbónico	\$ 13.99	12.18
Alambres de fierro y acero	\$ 38.77	28.81
Alambrón	\$ 14.23	12.92
Asfalto y mezclas asfálticas	-\$ 9.52	-11.56
Azulejos y losetas de cerámica	\$ 13.17	11.41
Barnices y lacas	\$ 22.94	18.47
Bloques y tabiques de concreto	\$ 44.30	30.48
Cal hidratada	\$ 28.85	22.24
Calentadores para agua	\$ 34.41	25.41
Cemento	\$ 38.31	27.62
Productos de alambre	\$ 18.10	15.36
Concreto premezclado	\$ 38.53	27.66
Alambres y cables con aislamiento	\$ 33.07	24.54
Vidrio plano	\$ 27.83	21.57
Otros productos químicos	\$ 33.66	25.88
Pinturas	\$ 27.80	21.39
Fibracel y tablero aglomerado	\$ 21.51	18.04
Ladrillos	\$ 18.74	15.74
Láminas y perfiles de plástico	\$ 35.13	26.20
Piezas metálicas fundidas y moldeadas	\$ 48.49	33.02
Productos de asbesto	\$ 37.23	27.07
Muebles y accesorios para baño	\$ 20.64	16.96
Válvulas para uso doméstico	\$ 36.11	26.22

## Capítulo 8

Otros productos de hule	\$ 41.03	29.09
Maderas de pino y otras maderas	\$ 29.54	22.73
Otros productos de concreto	\$ 23.51	18.99
Perfiles de hierro y acero	\$ 21.38	18.60
Afinación y laminación de aluminio	\$ 62.59	38.86
Soldaduras	\$ 31.96	23.44
Triplay	\$ 19.42	16.14
Tubos y postes de hierro y acero	\$ 36.55	26.05
Tubos de cobre	\$ 36.24	25.39
Tubería de plástico	\$ 29.32	21.54
Válvulas para uso industrial	\$ 35.82	26.42
Impermeabilizantes	\$ 26.67	20.86
Lingote y plancha de acero	\$ 26.21	22.55
Calderas y hornos industriales	\$ 53.03	35.40
Transformadores	\$ 6.62	5.91
Focos y tubos de iluminación	\$ 40.32	30.05
Maquinaria y equipo especial para la construcción	\$ 44.24	32.07
Grúas fijas	\$ 35.15	27.63
Elevadores y montacargas	\$ 54.86	37.36
Tanques metálicos	\$ 30.66	23.30
Bombas	\$ 39.31	28.14
Camiones	\$ 39.69	29.60
Otra maquinaria agrícola	\$ 44.05	31.46
Motores eléctricos	\$ 25.24	19.70
Tractores agrícolas	\$ 21.39	17.62
Llantas neumáticas para automóviles y camionetas	\$ 17.74	15.13
Fabricación de equipo de generación y distribución de energía eléctrica	\$ 25.47	20.26
Fabricación de equipo de aire acondicionado, calefacción y de refrigeración industrial y comercial	\$ 26.21	21.91
Gasolina	\$ 57.62	35.42
Diesel	\$ 63.16	37.53
Aceites lubricantes	\$ 20.54	17.17

### Contrastar el costo de Las Cruces y otras tecnologías (alternativas) para el SEM

El desarrollo y construcción de una hidroeléctrica requiere de tiempo, especialmente para una planta con configuración de reservorio. Los cos-

tos de inversión para las plantas hidroeléctricas nuevas, incluyendo la preparación del sitio y el trabajo de ingeniería civil, dependen significativamente de cada sitio. Los costos de inversión incluyen la planeación y estudios de viabilidad, estudios de impacto ambiental y permisos. Los

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

recientes costos de inversión para grandes hidroeléctricas varían de 1,050 a 7,650 USD/kW. Además, considerando los costos anuales de operación y mantenimiento, estos van del 1 - 4 % del monto de inversión; y los costos nivelados típicos de la electricidad (LCOE)<sup>(1)</sup> van desde 20 a 190 USD/MWh para las grandes hidroeléctricas (IEA-ETSAP, 2015). Además, la producción de las hidroeléctricas depende de las lluvias y la recepción de las corrientes que vierten en el área del reservorio. La capacidad del reservorio tendrá que ser compensada en periodos con baja precipitación y esto incrementará el costo de inversión (IEA-ETSAP, 2015).

México enfrena un problema que debe solucionar en cuanto a la pérdida de energía por transmisión y distribución de aproximadamente el 13 %, lo que representa \$ 42,246 millones de pesos (CFE, 2015), un monto equivalente a aproximadamente 5.42 veces el presupuestado para Las Cruces en el año 2012.

Los costos de la hidroelectricidad en el mundo<sup>(2)</sup> poseen un promedio de entre 1,000 – 3,000 dólares/kilowatt, mientras que en Las Cruces se tiene un precio de 2,441 dólares/kilowatt. En cuanto al factor de planta promedio en el mundo, este va de 40 a 60 %, regionalmente en América Latina se tiene un valor promedio de 54 %, en América del Norte 47 % y Las Cruces de 37 %. Contrastando la información anterior de IRENA (2018), el proyecto Las Cruces sería caro y sería el que menor producción tendría (Figura 1).

**Tabla 3. Vida útil en años (CFE, 2017).**

Tecnología	Vida útil
Carboeléctrica	40
Ciclo combinado	30
Combustión Interna	25
Eólica	25
Frenos Regenerativos	25
Geotérmica	30
Hidroeléctrica	60
Lecho Fluidizado	40
Nucleoeléctrica	60
Solar fotovoltaica	30
Termoeléctrica convencional	30
Termosolar	35
Turbogás	30

**Tabla 4. Costos fijos de operación y mantenimiento en dólares/kilowatt-año (CFE,2017).**

Tecnología	Valor medio
Carboeléctrica	33.2
Ciclo combinado	18.6
Combustión Interna	45.7
Eólica	37.5
Geotérmica	103.4
Hidroeléctrica	24.0
Nucleoeléctrica	99.5
Solar fotovoltaica	10.5
Termoeléctrica convencional	35.3
Termosolar	47.8
Turbogás	5.0

**Tabla 5. Costo unitario de inversión en dólares/kilowatt (CFE,2017).**

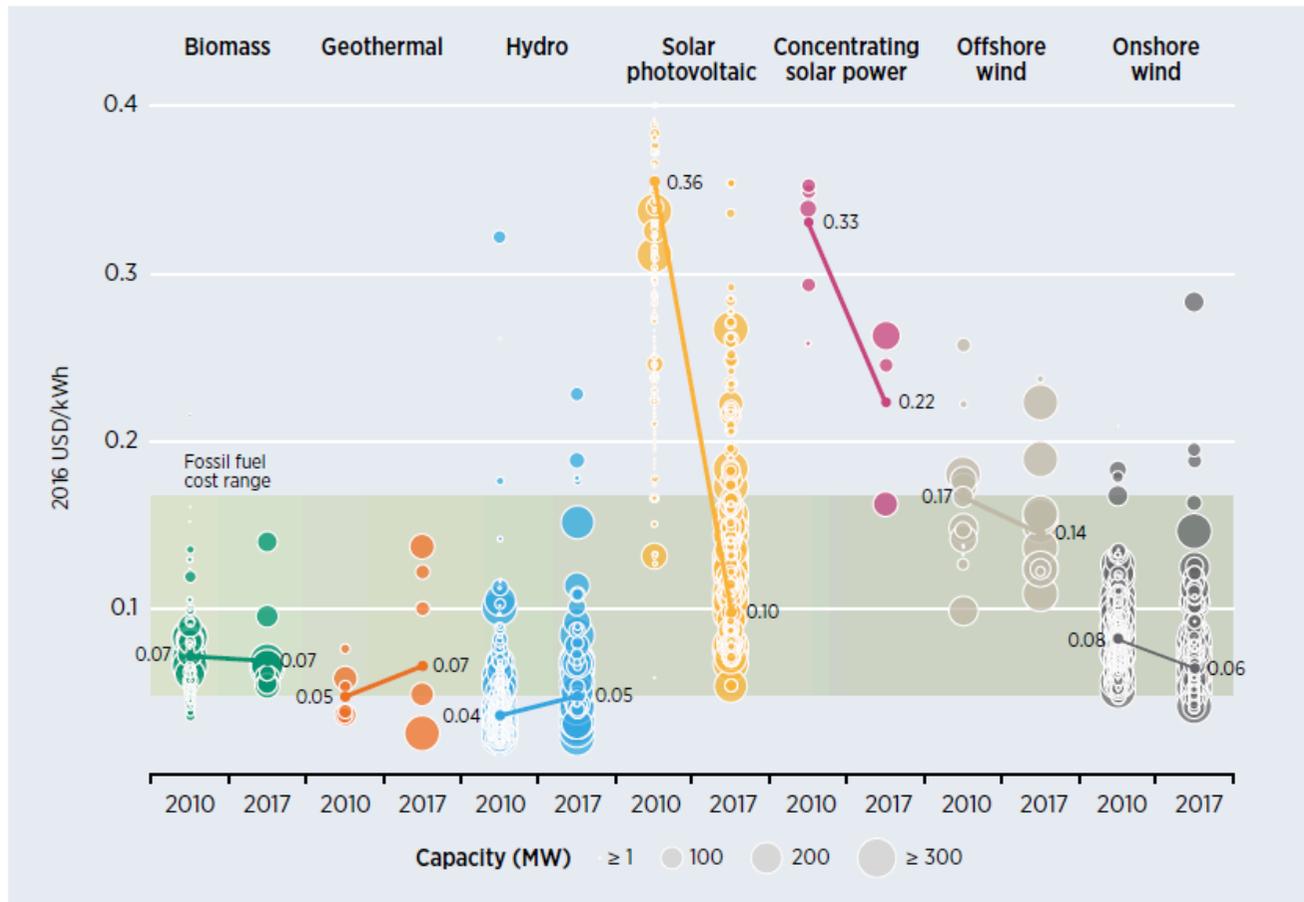
Tecnología	Valor medio
Carboeléctrica	1,402.4
Ciclo combinado	959.0
Combustión Interna	2,888.3
Eólica	1,400.0
Geotérmica	1,859.0
Hidroeléctrica	1,900.0
Nucleoeléctrica	3,924.0
Solar fotovoltaica	1,375.0
Termoeléctrica convencional	1,613.5
Termosolar	6,500.0
Turbogás	800.0

<sup>(1)</sup> La Nivelación del Costo de la Generación de Electricidad es el precio que debe tener la electricidad para que un proyecto pueda igualar costos y ganancias, incluyendo el retorno del capital invertido y a la tasa de descuento; en otras palabras, indica que tan rentable es un proyecto (IRENA, 2012d).

<sup>(2)</sup> [http://web.ing.puc.cl/power/alumno12/costosemc/C\\_Hidro.html](http://web.ing.puc.cl/power/alumno12/costosemc/C_Hidro.html)

## Capítulo 8

**Figura 1. Costo nivelado global de la escala de *utility* para la generación de energía eléctrica por tecnologías, periodo 2010-2017 (IRENA, 2018).**



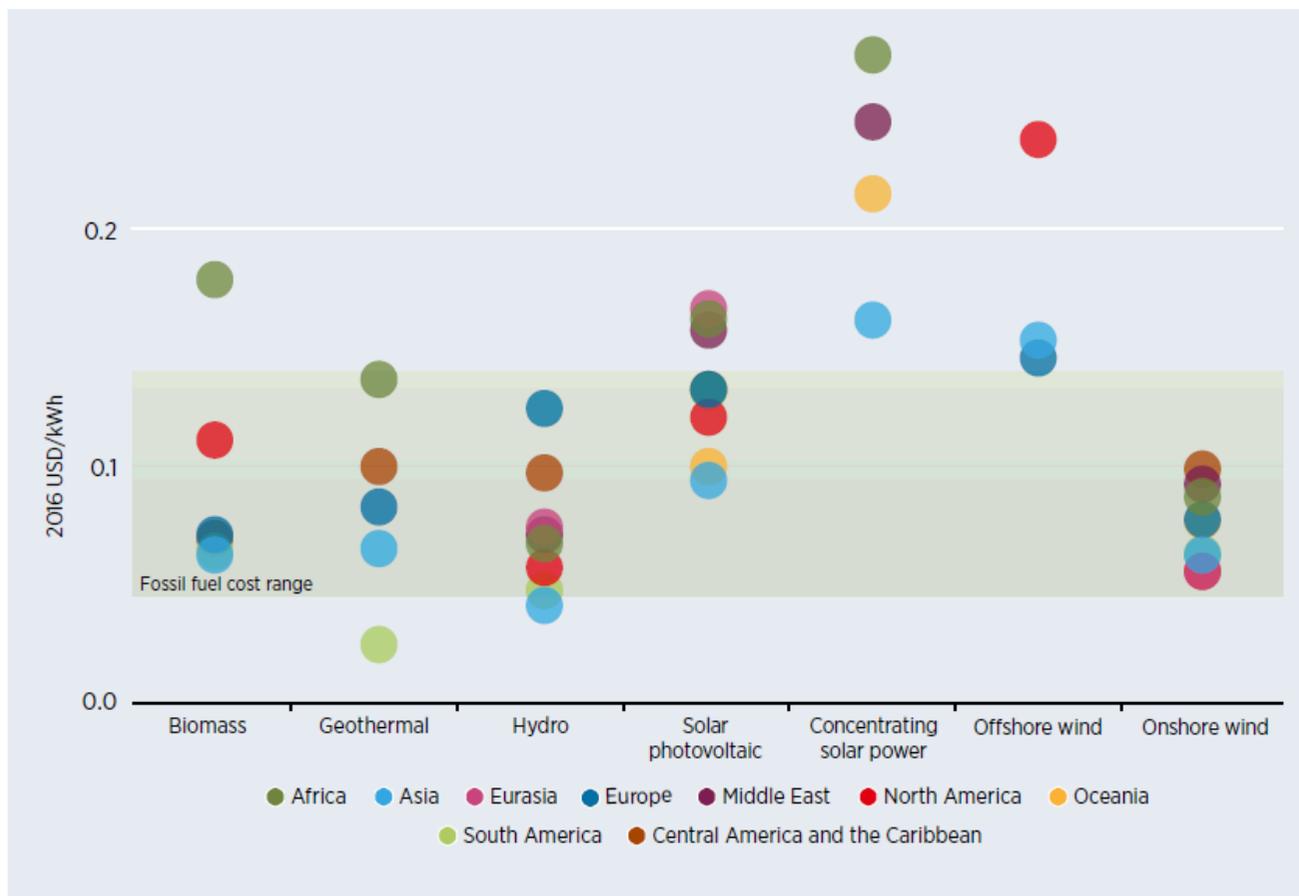
Las hidroeléctricas históricamente han producido la energía de más bajo costo en comparación con cualquier otra tecnología - y aun continúa siendo una opción de bajo costo-, donde los recursos económicos no han despuntado (países en vías de desarrollo). El costo nivelado para las grandes hidroeléctricas en sitios adecuados pueden ser tan bajos como 0.02 dls/kWh, sin embargo, la mayoría de los proyectos poseen un valor de 0.10 dls/kWh (IRENA, 2018). El costo promedio de la electricidad producida en una hidroeléctrica, con este esquema es de 0.036 dls/kWh - 0.046 dls/kWh entre 2010 - 2017. Comparando estos datos con la biomasa que permiten una producción de energía de has-

ta 0.03 dls/kWh, cuando se puede utilizar el calor generado para fines productivos. El costo nivelado de la biomasa logró reducirse un poco, entre 2010 y 2017 por debajo de 0.07 dls/kWh. Para las centrales geotérmicas el costo nivelado convencional varía de 0.04dls/kWh hasta alrededor de 0.13 dls/kWh, para proyectos recientes. Para proyectos eólicos en el mar este es de 0.14 dls/kWh (Figura 2).

La Figura 3 presenta el número de estudios que analizan el costo de más de 2,155 proyectos potenciales de hidroeléctricas en los Estados Unidos, con un total de 43 GW e identifica un costo promedio de capital de 1,650 dls/kW, con el 90%

## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

Figura 2. Costo nivelado con peso regional promedio de la electricidad generada con tecnología renovable, para el periodo 2016 y 2017 (IRENA, 2018).



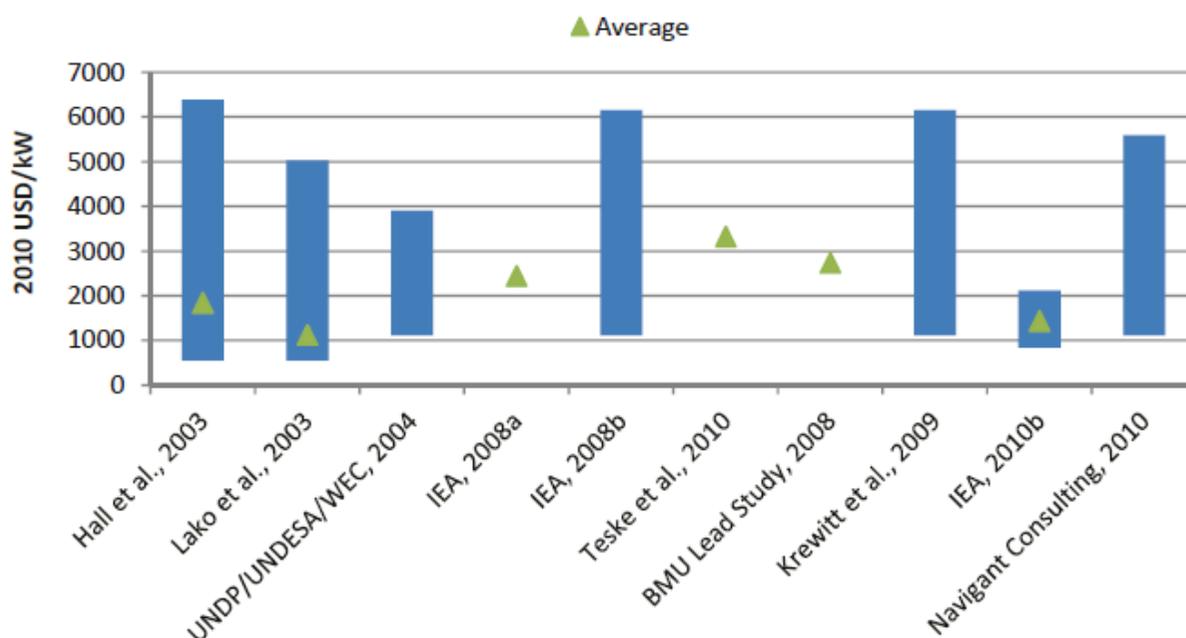
de los proyectos con un costo por debajo de los 3,350 dls/kW (Hall *et al.*, 2003). En otro estudio (Lako *et al.*, 2003), 250 proyectos al rededor del mundo con una capacidad total de 202 GW, poseen un costo promedio de 1,000 dls/kW y el 90% posee un costo de 1,700 dls/kW o menos (Lako *et al.*, 2003). Se puede deducir que el costo de las hidroeléctricas varía entre países y dentro de un mismo país, dependiendo de la cantidad de recursos disponibles, consideraciones especiales según el sitio y según la economía local, entre otros factores. Por otra parte, los costos más bajos de inversión son típicamente asociados con la adición de capacidad a hidroeléctricas existentes, repotencia-

lización, o mediante la instalación de turbinas en presas existentes que no poseen ninguna instalación relacionado a hidroeléctricas.

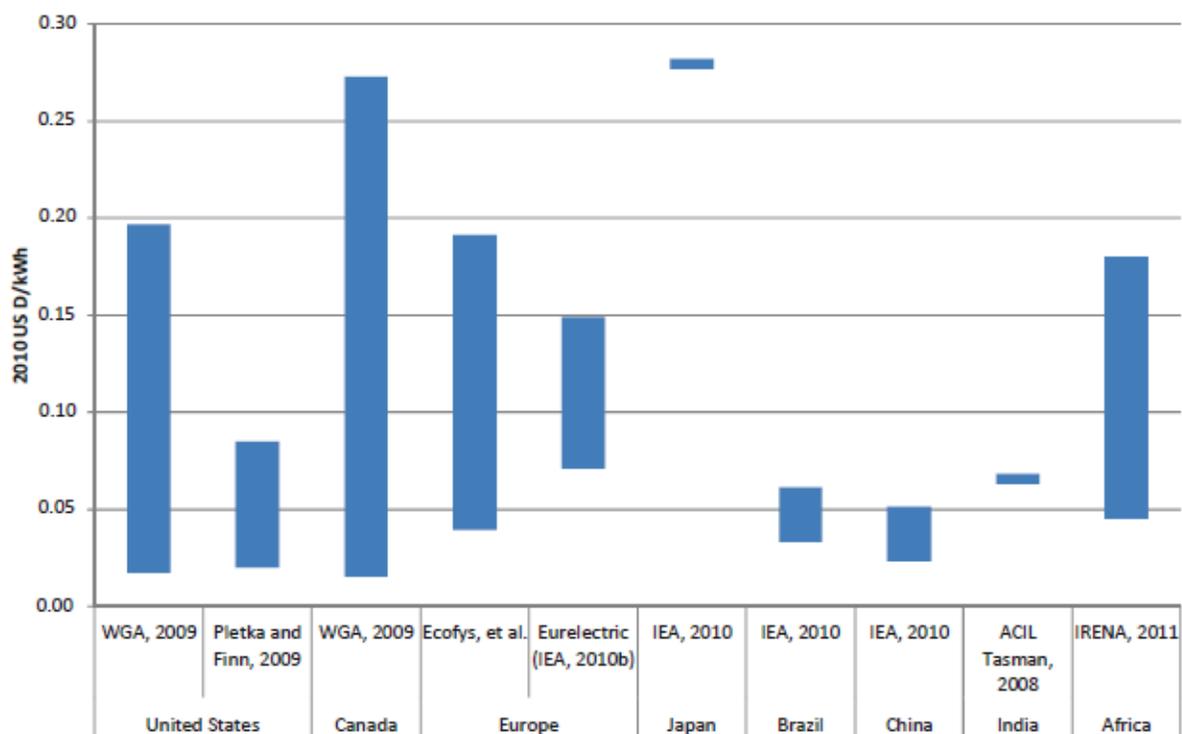
Un estudio reciente indica que los costos de operación y mantenimiento promedio es de 45 dls/kW año para proyectos hidroeléctricos grandes, y de alrededor de 52 dls/kW año para pequeñas hidroeléctricas (Ecofys *et al.*, 2011). Por su parte, los costos de inversión varían ampliamente desde 450 - 6,000 dls/kW. Los costos nivelados de la capacidad hidroeléctrica varía de 0.02 a 0.085 kWh, con los menores costos asociados a la repotencialización de plantas existentes (Figura 4) (Pletka y Finn, 2009).

## Capítulo 8

**Figura 3. Resumen de los costos de instalación de proyectos hidroeléctricos en Estados Unidos y el resto del mundo (IRENA, 2018).**



**Figura 4. Costos nivelados de la energía hidroeléctrica por país y región (IRENA, 2018).**



## Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

**Figura 5. Empleos directos e indirectos estimados en el sector de la energía renovable por tecnología (millón de empleos) (IRENA, 2018).**

	2014	Reference 2030	REmap Case 2030	REmapE 2030
 <b>Bioenergy</b>	3.0	4.4	9.0	4.9
 <b>Hydropower</b> (small and large)	1.7*	4.8	5.5	6.4
 <b>Solar</b> (including solar water heating)	3.3	2.6	6.4	7.2
 <b>Wind</b>	1.0	1.7	3.3	4.1
<i>Other renewables</i>	0.2	0.1	0.2	0.2
 <b>World total</b>	<b>9.2</b>	<b>13.5</b>	<b>24.4</b>	<b>22.8</b>

En cuanto al aporte social, la energía hidroeléctrica durante el 2014 produjo 1.7 millones de empleos, solo por encima de la eólica. Mientras que la bio-

energía produjo 3 millones y la solar 3.3 millones. Por lo que la componente social posee mayor impacto (positivo) en la tecnología solar (Figura 5).

### Referencias

- Commerford M., 2011** – Hydroelectricity: the negative ecological and social impact and the policy that should govern it, energy economics and policy, ETH (Swiss Federal Institute of Technology Zurich), 27 p.
- Hydropower, 2011** – Energy Technology Network, <http://www.etsap.org/E-techDS/PDF/E07-hydropower-GS-gct.pdf>
- Kiel K.A., Matheson V.A. y Golembiewski K., 2009** – College of the holy cross, department of economics faculty research series, paper no. 09-08.
- Kanter J., 2010** – Europe considers new taxes to promote “clean energy”. The New York Times.
- CFE, 2015** – Informe Anual, Comisión Federal de Electricidad, 112 p.
- IRENA, 2018** – Renewable Power Generation Costs in 2017, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 160 p.
- IRENA, 2012a** – Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series- Volume 1: Power Sector Issue 5/5 Wind Power, International Renewable Energy Agency, 64 p.
- IRENA, 2012b** – Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series-Volume 1: Power Sector Issue 4/5 Solar Photovoltaics, International Renewable Energy Agency, 52 p.
- IRENA, 2012c** – Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series - Volume 1: Power Sector Issue 3/5 Hydropower, International Renewable Energy Agency, 44 p.
- IRENA, 2016** – Renewable Energy Benefits: Measuring the Economics, International Renewable Energy Agency, 92 p.
- IRENA, 2012d** – Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series - Volume 1: Power Sector Issue 1/5 Biomass for Power Generation, 60 p.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

## Anexo I

### Primera aproximación del costo

$$C_{Total} = C_{reubicación} + C_{presa} + C_{co2} + C_{oym}$$

$C_{oym}$  = costo de operación y mantenimiento.

$C_{co2}$  = costo asociado a la producción de CO<sub>2</sub>.

$C_{presa}$  = costo por construcción de la presa.

$C_{reubicación}$  = costo por reubicación de personas.

$$C_{reubicación} = H \times P_{reubicación} + H \times P_{anual} \times t + H \times P_{histórico}$$

$P_{reubicación}$  = costo estimado por reubicación de la gente.

$P_{anual}$  = salario anual en el sitio reubicado en un año<sup>(3)</sup>.

$P_{histórico}$  = precio estimado de compensación por la pérdida histórica de la tierra.

$t$  = tiempo en años.

$H$  = número de casas movidas (calcular personas por hogar).

$$H = Q_{personas} \times 1 / h_{tasa}$$

$Q_{personas}$  = cantidad de personas que son afectadas por la presa.

$h_{tasa}$  = persona por casa (tasa).

Costo de la presa ( $C_{presa}$ ) = \$11,913,765,240.00 pesos (2018). Incluye un incremento del 23 % en el costo del material de construcción y la variación del dólar frente al peso.

Los costos de operación y mantenimiento ( $C_{oym}$ ) para una hidroeléctrica son entre 1.5 y 2.5 % del costo de inversión al año (Hydropower, 2011).

### Costo social del CO<sub>2</sub>

Al considerar el costo social asociado a la liberación del CO<sub>2</sub>, es necesario atribuir un precio apropiado para cubrir el costo de los daños causados (Kiel, Matheson y Golembiewski, 2009). Los costos van de \$ 1 dlls/ton a 1,500 dlls/ton (Kanter, 2010). Los costos sociales debido a las emisiones de CO<sub>2</sub> incrementan al ser los efectos del calentamiento global más notorios. Un precio de \$ 25 dlls/ton de CO<sub>2</sub> es usualmente empleado (Commerford, 2011). Para Las Cruces:

$$21,729 \text{ ton de CO}_2e \times 25 \frac{\$}{\text{ton CO}_2} = \$ 543,225 \text{ dólares} \sim \$ 10,118,600 \text{ pesos/año}$$

Es necesario agregar un impuesto a esto debido al costo por daños sociales y GEI (Commerford, 2011). Se debe considerar el costo de emisión de metano y de aseguramiento (seguro de la instalación).

<sup>(3)</sup> La pérdida de productividad se calcula según la encuesta nacional de ingresos y gastos de los hogares y el salario mínimo general promedio, que es de \$ 88.36 pesos diarios (Conasami, 2018).

# Conclusiones



## De carácter financiero

- ▼ Una primera aproximación del costo total de Las Cruces en 2018, sin considerar las externalidades del capítulo 5 y la reubicación de personas, sería de más de \$ 13,300 millones de pesos. Casi \$ 6 mil millones de pesos más de lo autorizado: \$ 7,325 mil millones.
- ▼ El sistema eléctrico en México presenta una pérdida de energía por transmisión y distribución de aproximadamente del 13 %, lo que representa \$ 42,246 millones de pesos anuales. Estos costos no se han valorado para el proyecto Las Cruces,

cuya principal demanda de energía proviene de Jalisco, Guanajuato, Michoacán y San Luis Potosí (73 %), entre otros estados.

- ▼ Las Cruces sería un proyecto caro y de baja producción de energía, comparada con otras partes del mundo. Mientras que el costo por kilowatt varía de 1,000-3,000 dólares, el de Las Cruces es de 2,441 dólares. En cuanto a la energía producida al año de acuerdo con su capacidad (factor de planta) el promedio en el mundo va de 40 a 60 %, regionalmente en América Latina se tiene un valor promedio de 54 %, en América del Norte 47 % y Las Cruces de 37 %.

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

## De carácter estratégico

- ▼ El proyecto hidroeléctrico Las Cruces ha sido retirado del Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (Prodesen) 2016-2030; y se propone en su lugar una diversificación de la matriz eléctrica con tecnología renovable (Prodesen 2017-2031).
  - ▼ El documento de SENER-IRENA (2015) señala que México puede lograr los 17 GW requeridos para el 2030 con las grandes hidroeléctricas que ya cuenta. Estas pueden experimentar un incremento de capacidad en sus unidades, lo cual debería realizarse, antes de construir nuevas hidroeléctricas. Por ejemplo, Infiernillo constaba de cuatro generadores de 160 MW y dos de 180 MW (1000 MW en total). Cuatro nuevas turbinas de 200 MW han reemplazado a las de 160 MW, por lo que su capacidad total aumentó a 1160 MW.
  - ▼ Durante 2016, las hidroeléctricas solo aportaron el 10 % de la generación total de energía producida en el país. Esta tecnología es altamente vulnerable frente al cambio climático, por la variabilidad en las precipitaciones y la captación de agua para las presas, y obliga a buscar otros tipos de energías limpias y renovables.
  - ▼ México enfrenta una crisis hídrica, por lo que la construcción de grandes presas no es estratégica, ya que en una presa el mayor consumo de agua es por evaporación y no en la generación eléctrica.
- ▼ La Generación distribuida, que es generar o almacenar la energía a pequeña escala cerca del lugar de consumo, representa una alternativa para aumentar la competitividad del país, debido a:
    1. La energía eléctrica en México es cara, aun con los subsidios, es 25 % más cara en promedio en comparación con EU, y en tarifa residencial de alto consumo hasta 150 %.
    2. La red mexicana es altamente ineficiente, pues posee pérdidas de hasta el 17 % por transmisión y distribución.
    3. El consumo de la energía está concentrado. Menos del 1 % de los usuarios de CFE consumen el 58.6 % de la energía eléctrica del país.
    4. México cuenta con una política de servicio universal, es decir, se busca proveer de energía a comunidades, zonas rurales o urbanas marginadas, muchas veces ubicadas en zonas remotas y con baja densidad poblacional, por lo que la Generación distribuida evitaría la pérdida en el proceso de transmisión.
    5. Ser competitivos, el gran potencial para producir energía con tecnología renovables, hace que la generación a pequeña escala pueda aumentar de 1.7 a 12 %.

## Conclusiones

### Impacto social en la salud

- ▼ El primer riesgo a la salud de un proyecto hidroeléctrico comienza con la llegada de un gran número de trabajadores a un área remota, los cuales comúnmente acarrean enfermedades infecciosas como: tuberculosis, sarampión, influenza, sífilis y SIDA. Durante la construcción de presas, enfermedades como la diarrea aumentan en el orden del 60 %.
- ▼ Nayarit y Durango son los únicos estados de la república que en 2015 elevaron su mortalidad en menores de 5 años por enfermedades diarreicas y relacionadas con el agua. Una presa de las características de Las Cruces aumentaría potencialmente estas cifras.
- ▼ Existen varias localidades y núcleos agrarios que deben ser relocalizadas y no solo San Blasito. Además, la reubicación de éste sería en un sitio de alto riesgo de desarrollo de enfermedades transmitidas por moscos, ya que se localizaría dentro del área de peligro de 2 km alrededor del vaso de la presa.
- ▼ Los problemas relacionados con las hidroeléctricas deberían poseer un componente de Justicia Ambiental, pues los más afectados son las sociedades más pobres y en específico las mujeres, dejándoles, entre otros efectos negativos, más vulnerables a enfermedades infecciosas.
- ▼ La salud de la mujer, en particular, es más impac-

tada por las hidroeléctricas debido a que en sus actividades cotidianas están en mayor contacto con agua potencialmente contaminada. Por lo que el problema, además de salud, es de justicia desde la perspectiva de género.

### Impacto ambiental no considerado

- ▼ Una hidroeléctrica en un clima tropical, durante sus primeros 10 años de vida, emitirá cuatro veces más carbono que una planta que funcione con combustibles fósiles. Es necesario agregar un impuesto que cubra los costos no contemplados en estos proyectos, como los daños sociales y los gases de efecto invernadero que emite, ya que son de alto impacto socioambiental.
- ▼ Los costos asociados a la reubicación de personas y animales no son considerados en los países en desarrollo, como es el caso mexicano. Este ajuste debería considerar la pérdida de terrenos ancestrales, y el impacto de daños étnicos y éticos.
- ▼ El cálculo de CFE sobre la emisión de gases ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ ) de efecto de invernadero para Las Cruces es incorrecto, por el grado de afectación que Las Cruces representa a la cobertura forestal.

### Externalidades no evaluadas

- ▼ La Ley de Transición Energética fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 2015, por lo que no es aplicable al **141**

# Proyecto Hidroeléctrico Las Cruces: Inviabilidad financiera y estratégica

proyecto hidroeléctrico Las Cruces, pero que para efectos de una evaluación de costo-beneficio en el 2018, debería considerarse por cuestiones de factibilidad económica y energética.

▼ Las principales externalidades recurrentes en la literatura y que no han sido evaluadas por CFE para Las Cruces para determinar su factibilidad son:

1. Emisión de Gases de Efecto Invernadero.
2. Reducción de la conectividad del sistema acuático o alteración de los regímenes de los flujos.
3. Cambios en los patrones de flujos - cambios en los niveles de sedimentación
4. Impacto en artefactos de importancia cultural, afectar a zonas de valor histórico o geológico.
5. Impactos estéticos
6. Eutrofización de los cuerpos de agua
7. Salud humana
8. Pérdida de agua en 4,491 gal/MWh
9. Uso de suelo
10. Construcción

11. Alteración de flujo-operación

12. Embalse-presa y control de flujos

13. Obras y operación de transmisión de energía eléctrica

▼ México no cuenta con un mecanismo o protocolo adecuado para evaluar el Impacto Sobre la Herencia Cultural (ISHC). Según la literatura consultada, los requisitos mínimos necesario para realizar los estudios ISHC son cuatro, de los cuales CFE no cumple con tres:

- i. Estudio de la Línea Base (antes del proyecto)
- ii. Estudios de Impactos (durante la construcción y operación del proyecto)
- iii. Recomendaciones de mitigación

Documento elaborado por  
SuMar - Voces por la Naturaleza, A.C.



